



U
N
E
X
P
O

INGENIERÍA METALÚRGICA

INGENIERIA METALURGICA

CALCULOS METALURGICOS

Tomo I

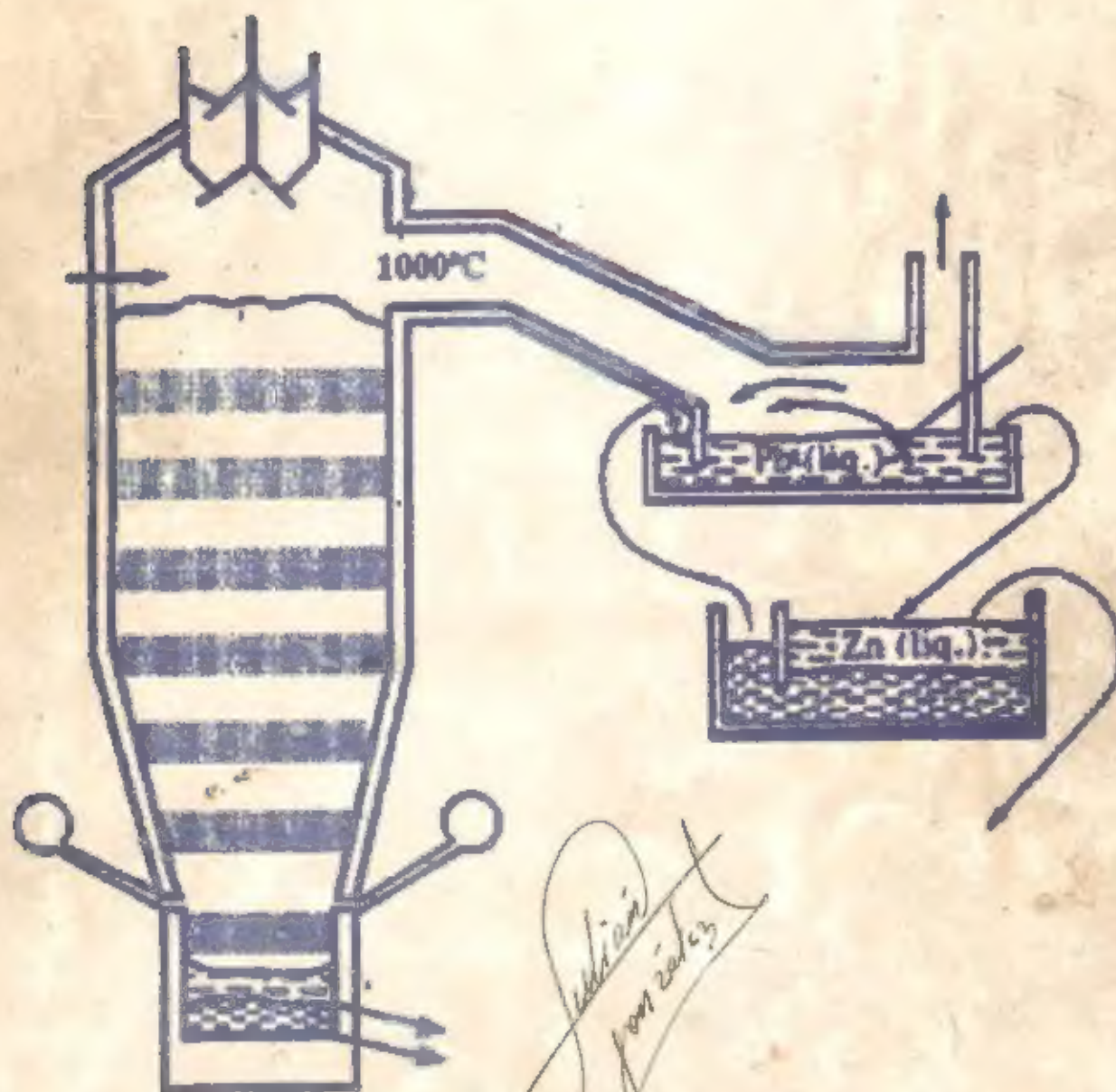
Digitalizado por: Katherine Miranda
<http://metalurgicaunexpo.blogspot.com/>



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITECNICA
ANTONIO JOSÉ DE SUCRE

CALCULOS METALURGICOS

TOMO I



ING.^o MIGUEL A. CORDOBA M.

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL POLITECNICA
"ANTONIO JOSE DE SUCRE"
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA
BARQUISIMETO

CALCULOS METALURGICOS

Por
Ing. MIGUEL A. CORDOBA M.
Profesor

Trabajo culminado durante la Licencia Sabática 1997 – 1998

Noviembre - 1998

CALCULOS METALURGICOS

TOMO I

CONTENIDO

TOMO I

PAGINA

PROLEGOMENO	vii
CAPITULO I	
CARGAS DE MOLIENDA Y CLASIFICACION	1
CAPITULO II	
CONCENTRACION	21
CAPITULO III	
REACCIONES QUIMICAS, ESTEQUIOMETRIA Y REACCIONES CON GASES	52
CAPITULO IV	
COMBUSTIBLES Y COMBUSTION	97
CAPITULO V	
PRODUCCION DE COQUE Y GAS	138
CAPITULO VI	
TERMOQUIMICA Y TERMOFISICA.	260
CAPITULO VII	
EL ALTO HORNO.	305
CAPITULO VIII	
PRODUCCION DE ACEROS.	345
CAPITULO IX	
PRODUCCION DE SOPLO Y CORRIENTES DE AIRE.	454
CAPITULO X	
BALANCES DE CALOR.	437

TOMO II

CAPITULO XI	
CALCULO DE CARGAS PARA LA FUSION.	525
CAPITULO XII	
ALEACIONES Y DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO.	536
CAPITULO XIII	
LEY DE ACCION DE MASAS Y EQUILIBRIO QUIMICO EN REACCIONES METALURGICAS.	625
CAPITULO XIV	

SECADO Y CALCINACION.	635
PAGINA	
CAPITULO XV	
TOSTACION Y SINTERIZACION.	643
CAPITULO XVI	
FUSION Y CONVERSION DEL COBRE.	669
CAPITULO XVII	
PROCESOS ELECTROLITICOS.	739
CAPITULO XVIII	
METALURGIA DEL ALUMINIO Y EL MAGNESIO.	785
CAPITULO XIX	
HIDROMETALURGIA.	802
CAPITULO XX	
VOLATILIZACION DE METALES EN LA FUSION.	812
CAPITULO XXI	
METALURGIA DEL PLOMO.	838
CAPITULO XXII	
TRANSFERENCIA DE CALOR.	889
CAPITULO XXIII	
PROCESOS DE DESTILACION.	917
CAPITULO XXIV	
PRESION DE VAPOR Y RELACIONES PRESION DE VAPOR - TEMPERATURA EN REACCIONES QUIMICAS.	952
CAPITULO XXV	
APENDICE (TABLAS).	995
BIBLIOGRAFIA.	1035

NOTAS SOBRE EL AUTOR

MIGUEL A. CORDOBA M es Profesor Titular de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO), adscrito al Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Vice - Rectorado de Barquisimeto, Venezuela. Obtuvo el título de Ingeniero Metalúrgico en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), 1971 y el de Magister Scientiarum en Metalurgia en la UNEXPO, 1992. El Ing. Córdoba ha realizado trabajos en el área de Fundición de Metales y en Concentración de Minerales por Flotación y por Gravedad. Desde el punto de vista administrativo, se ha desempeñado entre otros como Jefe de la Sección de Metalurgia Química (1982 - 1983) y como Jefe del Depto. de Ingeniería Metalúrgica de la UNEXPO (1983 - 1985). Ha desarrollado su labor docente a nivel de pregrado en los departamentos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Metalúrgica del Instituto Universitario Politécnico de Barquisimeto, hoy UNEXPO, impartiendo conocimientos en las asignaturas siguientes: Ciencia de Materiales, Tecnología de Materiales I, Tecnología de Materiales II, Procesos Metalúrgicos, Metalurgia Extractiva I, Concentración de Minerales por Flotación, Siderurgia y actualmente en Físico - Química Metalúrgica y en Termodinámica Metalúrgica.

*Gracias a YIRA y a DEYANIRA,
por el amor filial y marital que me
profesan.*

PROLEGOMENO

Desde el punto de vista de la Ingeniería Metalúrgica, el concepto de "metal puro", prácticamente carece de sentido; bien sea por la cantidad de materia prima que interviene en un proceso de obtención, porque tecnológicamente los metales deben asociarse para conseguir de ellos las mejores respuestas a las solicitudes que se les hacen cuando son puestos en servicio, e incluso porque cuando en la naturaleza se presentan en forma "metálica"; siempre lo hacen mezclados con una gran cantidad de impurezas o formando aleaciones naturales.

Desde que el mineral que contiene el metal es extraído, hasta que se pone en servicio a través del metal "técnicamente" obtenido a partir de él, tiene que pasar por un sin número de procesos y operaciones unitarias; algunos muy sencillos y otros muy complejos por la cantidad de factores que intervienen, pero siempre que se habla de la obtención de los metales industriales nos vemos inducidos a pensar en que estos se encuentran en un yacimiento (en forma mineral) que contiene millones de toneladas y que los equipos a propósito de su tratamiento, procesan miles de toneladas por unidad de tiempo; razón por la cual se hace casi imposible encontrar un factor de escala confiable que permita la representatividad de estas magnitudes con los resultados de un ensayo de laboratorio miniaturizado, que analice solo gramos, como convencionalmente se supone que se hace en universidades como la UNEXPO.

Para el estudio, comprensión y sistematización de las operaciones y procesos unitarios que contribuyen a la conformación de una ingeniería como la metalúrgica, al igual que un buen soporte teórico se hace necesario un buen equipamiento en lo referente a los laboratorios, pero estos últimos en lo relacionado con la ingeniería en general y particularmente los de metalurgia no se encuentran completos en ninguna universidad del mundo, entre otras razones, por el costo que suponen, por los permanentes cambios tecnológicos, por la magnitud y complejidad de la materia prima que se analiza y por la multiplicidad de procesos a los que van dirigidos; si tomamos en consideración el que cada paso en un proceso integrado supone la realización de pruebas de control y ajuste en muchas direcciones.

Razones como las anteriores obligan al estudiante de Ingeniería Metalúrgica a ser muy imaginativo, para poder abstraerse en la comprensión del fenómeno metalúrgico y así desarrollar toda su capacidad analítica e inductiva.

Como una ayuda a los estudiantes de Ingeniería Metalúrgica de la UNEXPO, Vice - Rectorado de Barquisimeto, se ha desarrollado el presente trabajo que consiste en la solución a 549 ejercicios relacionados con esta rama de la ingeniería; los cuales responden a una colección de problemas que de naturaleza teórico - práctica, aparecen en su mayoría propuestos en la bibliografía reportada al final mientras que otros son propuestos por mí. Muchos de estos ejercicios están formulados con datos reales extraídos de procesos en planta, y en general conducen al estudiante a un mejor entendimiento de esta carrera.

Se espera que los ejercicios seleccionados puedan servir de apoyo y consulta, para una mejor comprensión de asignaturas como: Fisicoquímica, Termodinámica, Procesos Metalúrgicos, Metalurgia Extractiva I, Metalurgia Extractiva II, Concentración de Minerales por Flotación, Siderurgia, Metalografía y Fundición.

Para el estudio de la ingeniería, la resolución de problemas numéricos no solo sirve para demostrar o comprobar los principios sobre los cuales estos se fundamentan, sino también, para desarrollar la habilidad con que se pueden utilizar estos principios cuando se trata de enfrentar un trabajo de orden práctico. Por eso, los problemas fueron seleccionados para poner de manifiesto los métodos que se emplean corrientemente en la industria al momento de calcular las cargas de los hornos, los volúmenes de gas, el calor y su flujo, los índices de recuperación, los rendimientos, etc.

El mayor valor de un trabajo como este es quizás el de preparar al estudiante en la aplicación de diferentes principios técnicos a un problema específico. La integración, correlación y aplicación de principios que el alumno ha aprendido o asimilado de una manera más o menos aislada

en sus cursos de química, física, termodinámica, matemáticas y otras ramas de la ciencia, buscando con eso, cerrar la brecha entre la teoría y la práctica.

Por razones de tiempo no se refieren los fundamentos teóricos sobre los que se apoyan las soluciones a los ejercicios que aparecen en cada capítulo, tampoco se incluye ningún tipo de material descriptivo, así como el dibujo de los diversos aparatos que intervienen en un proceso tales como hornos, trituradoras, molinos, filtros, condensadores, etc. Solo en casos muy especiales se ha hecho necesario la inclusión de algún tipo de esquema que pueda hacer comprensivo el flujo de la materia y el calor. Se espera por tanto que toda la información preparatoria sea obtenida por el estudiante en sus clases teóricas y en sus consultas bibliográficas.

No se recomienda a los estudiantes abordar la lectura o el estudio de los ejercicios de este trabajo, si antes no se ha dejado bien esclarecido el fundamento teórico, pues aunque algunos de ellos son tan sencillos que apenas requieren de una operación con la calculadora; otros contienen cálculos muy laboriosos y se corre el riesgo de memorizarlos para reproducirlos mecánicamente sin comprenderlos, con la consecuencia de no saber que hacer si se introduce una ligera modificación en los datos o en el texto planteado. Lo que si se recomienda previamente es la lectura de la bibliografía propuesta como un complemento a la información obtenida en las clases.

Tampoco es lo adecuado "tirar un cachazo" para ver que sale, porque eso representaría una muestra de inseguridad en lo estudiado. El estudiante debe estar seguro de la comprensión de cada uno de los aspectos particulares que plantea el ejercicio y de poder concatenarlos sistemáticamente hasta llegar a un entendimiento racional del planteamiento y de la solución del problema. Incluso, si se tienen claros los principios fundamentales, ser capaz de plantear alternativas a la solución presentada sin mayores dificultades.

El contenido del presente trabajo fue distribuido de la siguiente forma:

CAPITULO I (14 Ejercicios). Los cálculos realizados se pueden resumir de la siguiente manera: Distribución, por peso y por volumen, de las cargas (mineral más cuerpos moleadores) en un molino de bolas - Densidad de un mineral a partir de sus especies componentes - Ordenación sistemática, mediante fórmulas, de los componentes de una superficie clasificadora como son el número de la malla (conocido también como # mesh o # del tamiz), la luz o abertura de la malla y el diámetro del alambre - Correlación de los tamices que conforman una serie para determinar la posición o ubicación de cualquiera de ellos si se toma otro tamiz como referencia - Velocidad crítica del molino.

Casi todas las fórmulas que aparecen en este capítulo fueron introducidas por mi (no se encontraron en la bibliografía consultada), pero el principal aporte personal consistió en el cálculo de una serie nueva de tamices, sobre la base de una progresión geométrica cuya razón fue $\ln 3$ (ejercicio # 14).

CAPITULO II (27 ejercicios). Se realizan cálculos relacionados con la concentración de minerales por gravedad, medios densos y flotación, abordando aspectos como los siguientes: Isodromía y Velocidad de Caída Límite (Influenciadas por propiedades como la densidad, la forma y el tamaño de los granos). - Clasificación Previa a la Concentración por Gravedad, para determinar el número necesario de tamices. - Tiempo utilizado en el descenso de partículas en un medio fluido en reposo. - Comportamiento de Partículas en Corriente Ascensional, para lograr una separación completa de las especies. - Preparación Sintética de Reactivos de Flotación. - Cantidad de reactivos a utilizar en una operación de flotación. - Determinación de la Densidad de la Pulpa para Flotación. - Relación Agua-Sólido. - Gravedad de la Pulpa. - Peso de los Productos de Flotación (concentrados y colas). - Razón de Concentración. - Diseño Determinativo del Factor de Escala, para tiempos de retención en laboratorio y en planta. - Determinación del Número de Celdas, necesarias para flotar una cantidad determinada de mineral. - Manera de Agrupar las Celdas, dependiendo del flujo de la pulpa. - Parámetros de Recuperación.

CAPITULO III (44 ejercicios). Apoyados en la Ley de Conservación de la Materia y utilizando diferentes sistemas de unidades, en términos generales se enfocaron aspectos como los siguientes: Balances Estequiométricos. - Reacciones con Gases. - Balance de Materias, para diferentes procesos con y sin exceso de reactivos. - Relaciones Estequiométricas, para reacciones tanto homogéneas como heterogéneas. - Relación entre masa y volumen para sustancias gaseosas. - Composición Mineralógica y de Mezclas de Sustancias, en diferentes estados. - Densidad y Peso Específico Relativo, utilizando escalas en términos de grados Baumé, API y Twaddell. - Aplicación de la Ley de los Gases Ideales. - Relaciones entre masa, presión y temperatura. - Cambios de condiciones de los gases ideales. -

Determinación de Peso Molecular Promedio de una mezcla gaseosa. Determinación de la Fórmula de un Compuesto Gaseoso.

CAPÍTULO IV (70 ejercicios) Los cálculos de este capítulo se resumen así: Combustibles Sólidos (composición, cenizas, residuos, carbono sin quemar). - Análisis y Calidad de los Carbones. - Efecto del Azufre en los Carbones. Combustibles Líquidos. Combustibles Gaseosos, húmedos y secos. Cambio del Volumen del Gas, con la temperatura y la presión. - Combustión (completa e incompleta). - Aire necesario para la combustión (teórico, exceso, enriquecido, húmedo, seco, frío y precalentado). - Productos de Combustión (húmedos y secos). - Potencia Calorífica del Combustible (sólido, líquido y gas). - Contenido de Calor, en un cuerpo caliente. - Temperatura Obtenida en la Combustión (llama). - Pérdidas y Recuperación del Calor.

En el apéndice aparecen tablas extraídas de (7), las cuales fueron utilizadas como apoyo a la solución de los ejercicios de este libro. Para la solución de los ejercicios seleccionados de otros libros, como los que aparecen en la bibliografía reseñados con los números (8), (9) y (11), se siguen mecanismos diferentes a los de (7) y las tablas que se utilizaron no aparecen en el apéndice. Por tanto, se recomienda al estudiante o al lector de este trabajo consultar dichas tablas en los textos de la referencia.

CAPÍTULO V (38 ejercicios) Los cálculos realizados en este capítulo, en términos generales se refieren a Producción de Coque y Sub-productos. - Coque Producido, por tonelada de carbón utilizado. - Potencia calorífica (del coque y del carbón). - Producción de Gas (de aire, de gas, pot re, de coque, etc.). - Gas Producido (seco y húmedo), por tonelada de carbón. - Potencia Calorífica del Gas.

CAPÍTULO VII (42 ejercicios) Cálculos realizados sobre Alto Horno y Cubilote. Beneficio del Hierro. Reducción de Óxidos. - Consumo de Carbono (al frente y encima de las toberas). - Consumo de Coque (en el alto horno). - Ecuación de Reducción y Consumo Teórico de Coque. - Consumo de Aire y su Precalentamiento en Estufas. - Uso del Aire Enriquecido. - Peso del Mineral y del Fundente. - Producción y Utilización del Gas de Alto Horno. - Producción de Arrabio y de Escoria. - Composición del Arrabio, de la Escoria y del Gas de Alto Horno. - Balance de Cargas del Alto Horno. - Temperatura Teórica Máxima del Alto Horno. - Temperatura Crítica, Consumo de Coque y Potencia Requerida para la Fusión. - Eficiencia Térmica de las Estufas y las Máquinas a Gas. - El Cubilote.

CAPÍTULO VIII (26 ejercicios) Cálculos realizados sobre producción de acero. PROCESO BESSEMER. Arrabio Cargado. Requerimientos de Aire Normal y Enriquecido. - Tiempo de Duración de los Periodos de Soplado para la Eliminación de Impurezas. - Corrosión del Revestimiento Refractario. - Peso y Composición de los Productos del Proceso (acero, escoria y gas). - Productos Gaseosos en cada Periodo. - Adición de CaO en el Proceso Básico. - Adición de Ferroaleaciones. - Generación de calor en cada Periodo por Oxidación de Impurezas. HORNO DE HOGAR ABIERTO (Open Hearth). Flujo de Gases en el Horno. - Carga y Productos del Proceso. - Oxidación de Impurezas. - Desoxidación. - Eficiencia de los Regeneradores de Calor. HORNO ELÉCTRICO. Tiempo Requerido para el Calentamiento, Fusión y Sobrecalentamiento de la Carga. - Refino del Acero. Ferroaleaciones Desoxidantes. - Desulfuración del baño. - Balance de cargas. - Eficiencia Electrotérmica de cada Periodo. - Requerimientos de Potencia Eléctrica.

CAPÍTULO IX (12 ejercicios) Cálculos realizados. Requerimientos de Potencia para Comprimir el Sople (Fórmula Adiabática y o Método Diagramático). - Volumen de Aire y Cálculo de la Velocidad del Gas. - Tiro o Corriente de Aire. - Utilización del Gas de Alto Horno en Estufas para Calentamiento y en Máquinas a Gas. - Generación de Potencia en Máquinas a Gas. - Condiciones de Soplado en Convertidores. - Tiempo de Soplado por Periodo en Convertidores. - Poder Ascensional de los Gases. - Altura de la Columna de gas. - Eficiencia de la Chimenea.

CAPÍTULO X (17 ejercicios) Resumen de los Cálculos Trabajo (presión - volumen). Entalpía. - Energía Interna. CALOR SUMINISTRADO. Calor Generado por la Combustión de los Combustibles. - Producción de Energía en Hornos Eléctricos. - Calor Sensible en el Combustible Precalentado. - Calor Sensible en el Aire Precalentado. - Calor Sensible en la Carga del Horno. - Calor Desarrollado en el Horno por las Reacciones Exotérmicas. Calor de Formación de la Escoria. DISTRIBUCIÓN DEL CALOR. Calor Consumido en el Horno por Reacciones Endotérmicas. - Calor Utilizado en Evaporación de la Humedad. - Calor Absorbido por el Agua de Enfriamiento. - Calor de Formación del Arrabio. - Calor Utilizado en la Reducción de Óxidos. - Calor Utilizado en la Descomposición de los carbonatos. - Calor Absorbido cuando $\text{FeS} \rightarrow \text{CaS}$. - Calor Sensible en los

Productos de Combustion Calientes. — Calor Sensible en los Productos Principales del Horno (metal o mata) — Calor Sensible en la Escoria. — Perdidas de calor por Conduccion, Conveccion y radiacion. Eficiencia Termica del Alto Horno. **BALANCES DE CALOR.** Balances de Calor del Alto Horno. — Balance de calor del Convertidor Bessemer. — Balances de Carga y de Calor del Horno de Hogar Abierto. — Balance de Calor de un Horno Giratorio. — Balance de Calor en Procesos de Coquizacion. — Balances de Carga y de Calor en un Horno Eléctrico.

CAPITULO XI (5 ejercicios) Resumen de los Calculos. **CALCULO DE CARGAS PARA EL ALTO HORNO.** Método de Sumatoria de Lima (CaO) — Método Algebraico.

CAPITULO XII (29 ejercicios) Resumen de calculos sobre aleaciones binarias. Porcentajes Atómico y en Peso de los Componentes. — Constitucion de Diagramas de Equilibrio con Diferentes Tipos de Solubilidades. — Curvas de Enfriamiento. — Fases Presentes en una Aleación a una Temperatura Determinada. — Determinacion de la Composición de Cada fase Presente en una Zona de Coexistencia. — Cantidad Relativa de Cada Fase en la Zona de Coexistencia ((Regla de las Palancas, Método Diagramático y o Método Algebraico). — Calor de Fusion de Aleaciones. — Gravedad Especifica. — Porcentaje del Campo Visto Bajo el Microscopio Correspondiente a Cada Constituyente. — Calculos Metalograficos para Aceros y Fundiciones. — Reacciones que Ocurren en Sistemas Binarios (eutéctica, peritéctica, etc.).

CAPITULO XIII (6 ejercicios) Resumen de los cálculos. Constantes de Equilibrio. — Composicion Alcanzada en el Equilibrio. — Equilibrio y Cambios de Energia Libre. — Dirección Predominante en una Reaccion. — Porcentaje de Reactivos Consumidos en Reacciones Reversibles. — Presiones Parciales. — Temperatura de Equilibrio.

CAPITULO IV (3 ejercicios). Resumen de Calculos. Secado de Gases y Minerales. — Velocidad de los Gases en el Secado. — Contenido de Calor en el Gas y en el Mineral al Entrar y Salir del Secador. — Balance de Calor en una Operacion de Secado. — Eficiencia Térmica en el Secado. — Condiciones de Calcinación.

CAPITULO XV (11 ejercicios) Resumen de Cálculos. Calor Generado en la Tostación. — Balances de Carga y de Calor. — Aire Requerido para la Tostacion. — Peso del Mineral Antes y Después de la Tostación. — Composición del Mineral Tostado. — Azufre Eliminado en la Tostacion. — Gases de la Tostación. — Combustible para la Tostación. — Peso del Sinter.

CAPITULO XVI (29 ejercicios) Resumen de Cálculos. Cálculo de la Carga para la Fusión (mineral, fundente, combustible, aire). — Métodos de Cálculo (algebraico, fundente). — Productos de la Fusion (mata, escoria, gas). — Conversion a Cobre Blister. — Contenido de Cobre y otros Elementos en un Mineral. — La Mata (peso, grado y composicion). — Tiempos de Conversion (escorificación, formacion del blister). — Velocidad de Soplado para la Conversion. — Temperatura Alcanzada en el Convertidor. — Generación de Calor. — Balance de Cargas. — Balance de Calor.

CAPITULO XVII (27 ejercicios). Resumen de Cálculos. Refino Electrolítico. — Cantidad de Metal Depositado. — Tiempo Requerido para el Depósito. — Circuitos en Serie y en Paralelo. — Depósitos a partir de Soluciones Lixiviadas. — Anodos Solubles de Diversa Composicion. — Intensidad, Densidad y Eficiencia de la Corriente. — Numero de Tanques por Circuito y por Planta. — Capacidad de la Planta. — Composición del Voltaje de la Celda (conduccion, reaccion, gaseoso). — Regla de Thomson. — Volaje por Tanque. — Resistencia y Resistividad del Electrolito. — Separación entre Electrodo. — Potencia Eléctrica Requerida por la Planta. — Volumen de Gas Liberado en el Proceso.

CAPITULO XVIII (9 ejercicios) Resumen de los Calculos. Carbono Reductor de la Alumina en la Bauxita. — Potencia Requerida para el Tratamiento de la Bauxita. — Obtención Electrolitica del Aluminio. — Tratamiento del Al_2O_3 en Celda Hall. — Tratamiento del Al_2O_3 por el Proceso Bayer. — Electrólisis del Magnesio por el Proceso de Clorización. — Electrólisis del Magnesio (Proceso Oxido).

CAPITULO XIX (4 ejercicios). Resumen de los Cálculos. Lixiviación del Cobre. — Lixiviación y Electrólisis del Zinc. — Cianuración y Precipitación con Polvo de Zinc.

CAPITULO XX (22 ejercicios). Resumen de los Cálculos: Cálculo del Punto de Fusión. - Punto Normal de Ebullición. - Calor Latente de vaporización. - Utilización de una Ecuación del Tipo $\log P = -A/T + B$ (Clausius Clapeyron). - Porcentaje de Saturación de Aire con Agua. - Humedad Relativa del Aire. - Presión de Vapor. - Obtención de Metales por Condensación. - Cambios de la Temperatura con la Presión (Clausius Clapeyron). - Temperatura de Condensación de los Metales. - Cantidad de metal Volatilizado. - Pérdidas de Metal por Volatilización.

CAPITULO XXI (21 ejercicios). Resumen de los cálculos: Composición de Concentrados de Mineral de Plomo. - Composición del Mineral de Plomo Tostado. - Tostación del Mineral de Plomo (carga y productos). - Balance de Calor en la Tostación de Minerales de Plomo. - Sinterización del Mineral de Plomo. - Reducción del Mineral de Plomo en Alto Horno (carga y productos). - Pérdidas de Plomo por Volatilización. - Desplateado del Plomo con Zinc. - Refino Electrolítico del Plomo.

CAPITULO XXII (12 ejercicios) Resumen de los cálculos: Flujo de Calor por Conducción. - Sección para la Trayectoria del Flujo (Media Aritmética, Media Logarítmica). - Pérdidas de Calor por Convección y Radiación. - Emisividad. - Resistividad de Materiales. - Temperatura de Cuerpo Negro. - Calor Perdido y Temperatura de la Superficie de un Horno. - Tiempo Requerido para el Calentamiento de la Carga a la Temperatura de Operación. - Diferencia de Temperatura entre las Superficies Interna y Externa de un Horno. - Velocidad del Flujo de Calor.

CAPITULO XXIII (18 ejercicios) Resumen de los Cálculos: Producción de Óxido de Zinc. - Composición de los Vapores Producidos al Reducir el ZnO en Retortas. - Requerimientos de Carbono para Reducir el ZnO. - Requerimientos de Calor para Reducir el ZnO. - Condensación del vapor de Zinc. - Pérdidas de Zinc Como Vapor no Condensado. - Temperaturas del Condensador. - Balance de Calor en un Condensador. - Condensación en la Producción de Mercurio.

CAPITULO XXIV (22 ejercicios) Resumen de los Cálculos: Presión de Vapor y su Relación con la Temperatura. - Cálculo de la Constante "B" a partir de la Constante "A" y el Punto Normal de Ebullición. - Aplicaciones de la Regla de Trouton. - Determinación de las Constantes "A" y "B", a partir del conocimiento de un par de valores de "p" y "T". - Determinación del Calor de Vaporización, a partir de medidas de la Presión de Vapor. - Fórmula de la Presión de Vapor para Sólidos (sublimación). - Precisión de la Fórmula de $\log P$ para el Zinc. - Efecto del Calor de Combinación de los Elementos en una Aleación. - La Superficie como un Factor en la Presión de Vapor. - Determinación de las Constantes "A" y "B", a partir de medidas de las Presiones de Reacción. - Cálculo de la Temperatura para la Reducción Continua del ZnO por el C

Todos los cálculos que aparecen en el presente trabajo fueron realizados y revisados por la misma persona, lo cual induce a pensar que los fundamentos en que se apoyan, hayan sido aplicados con un solo criterio, y esto a su vez, puede convertirse en una fuente de imprecisión y/o error. Por esta razón, debido a que esta es la primera presentación de este trabajo, mucho se sabrán agradecer los comentarios, críticas, correcciones, discusiones y sugerencias que conduzcan a una mejoría del mismo.

Miguel Angel Córdoba Moreno.

Barquisimeto, Venezuela,
Noviembre, 1998.

CAPITULO I

CARGAS DE MOLIENDA Y CLASIFICACION

EJERCICIO N° 1

Para la molienda de un mineral de cobre de bajo tenor, se utilizó un molino de bolas cuyo diametro interior era de 1,5 m y tenia de longitud 3,0 m (ver Fig. 1).

El volumen total de la carga (mineral mas cuerpos moledores), fue del 50% de la capacidad del molino, y los cuerpos moledores (bolas de acero al Mn con densidad de 7.79 g/cm^3), constituyeron el 40% de la carga en volumen.

Con el objeto de obtener la granulometria deseada, se utilizó la carga de cuerpos moledores de arranque que se muestra a continuación:

CUERPOS MOLEDORES DE ARRANQUE

BOLAS					
DATOS PROPORCIONADOS		DATOS CALCULADOS			
Diametro (m)	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (kg.)	Volumen total (m^3)	# total de bolas
5.0	17.0	8,36	1404,48	0,180	168
4.5	25.0	6.09	2064.51	0,265	339
4.0	20.0	4,28	1652,08	0,212	386
3.5	15.0	2,87	1293,84	0,159	432
3.0	10,0	1,81	828,98	0,106	458
2.5	6,4	1,04	526,24	0,068	506
2.0	3,8	0,54	316,98	0,040	587
1.5	2.8	0,23	235,76	0,030	1075

PREGUNTAS

1. Rellenar la tabla para los cuerpos moledores de arranque.

SOLUCION

1. Para la solución de este interrogante, vamos a realizar el cálculo para una fila (diametro de 5,0 pulgadas), que se encuentra resaltada en **negritas** en la tabla, advirtiendo que para las demás filas se procede de manera similar.

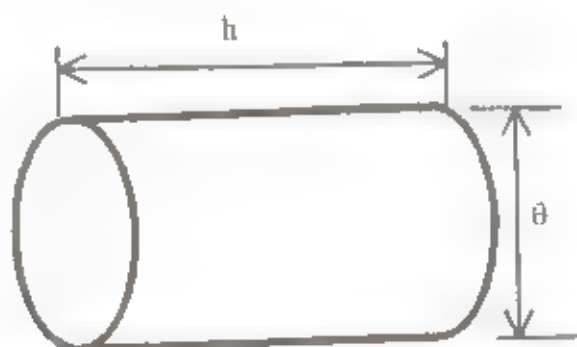


Figura N° 1: Vista de un Molino de Bolas

Lo primero es el cálculo del volumen interior del molino, utilizando la expresión (1)

$$V = \pi r^2 h \quad (1)$$

Donde

V = volumen interior del molino (m^3)

θ = diámetro interior del molino (m) = $2r$

r = radio interior del molino

h = longitud del molino (m)

$$V = \pi (1,5/2)^2 \times 3 = 5,301 \text{ m}^3$$

Calculamos el volumen de la carga.

$$V_{\text{carga}} = 5,301 \times 0,5 = 2,651 \text{ m}^3$$

Volumen total de las bolas = $2,651 \times 0,4 = 1,060 \text{ m}^3 = 1'060\,287 \text{ cm}^3$

Con la expresión (2), calculamos el peso total de las bolas:

$$D = W + V \quad (2)$$

Donde

D = densidad (g/cm^3)

W = peso (g)

V = volumen (cm^3)

$$W (\text{total bolas}) = 1'060\,287 \times 7,79 = 8'259.635,73 \text{ g} = 8259,64 \text{ Kg.}$$

Este peso, debemos distribuirlo en cada una de las especies de bolas, de conformidad con lo que muestra la tabla en las columnas de "DATOS PROPORCIONADOS".

Seleccionemos la especie de bolas cuyo diámetro es 5,0 pulgadas y utilicemos la ecuación (3) para calcular su volumen.

$$V_s = (4/3)\pi r^3 \quad (3)$$

$$\theta = 5,0 \text{ in} = 12,7 \text{ cm}$$

$$V_s = (4/3)\pi (12,7/2)^3 = 1072,53 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de 1 bola} = 1072,53 \times 7,79 = 8355,02 \text{ g} = 8,36 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso total de estas bolas} = 8259,64 \times 0,17 = 1404,14 \text{ Kg.}$$

$$\# \text{ de estas bolas} = 1404,14 / 8,36 = 168$$

$$V(\text{total de estas bolas}) = 168 \times 1072,53 (1/100^3) = 0,1802 \text{ m}^3$$

Estos resultados que aparecen en *negritas*, son los que también están resaltados del mismo modo en la columna "DATOS CALCULADOS" de la tabla. De esta manera se procede para el cálculo de todas las demás filas que rellenan la tabla (1-1).

EJERCICIO N° 2

Un mineral de cobre tiene la siguiente composición:

Calcopirita (CuFeS_2)	1,86% (4,20)
Calcosita (Cu_2S)	0,18% (5,70)
Lenorita (CuO)	0,05% (6,10)
Pirita (FeS_2)	36,84% (4,51)
Galena (PbS)	2,18% (7,58)
Cuarzo (SiO_2)	57,75% (2,65)

(Los números entre paréntesis representan las densidades)

Este mineral es reducido de tamaños en molinos de bolas (ver Fig 1), acoplado en circuito abierto, para la realización de moliendas primaria, secundaria y terciaria, hasta obtener la granulometría adecuada para la posterior etapa de concentración.

Los molinos tienen c/u 2,2 m de diámetro y 3,0 m de longitud.

La carga de arranque (mineral más cuerpos molidores) de c/u de los molinos, constituye el 50% de la capacidad del molino, y el mineral representa el 50% del volumen de la carga; los cuerpos molidores fueron bolas de acero al Mn (densidad = $7,79 \text{ g/cm}^3$).

La distribución de los cuerpos molidores de arranque, se muestra en el cuadro que aparece en la página siguiente.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso del mineral.
2. Rellenar la tabla para los datos de la carga molidora.

SOLUCION

Haciendo uso de (1), calculamos el volumen interior del molino, sabiendo que $r = (2,2/2) \times 100 = 110 \text{ cm}$, y que $h = 3 \times 100 = 300 \text{ cm}$, por tanto:

$$V_{\text{molino}} = \pi (110)^2 \times 300 = 11'403\,981,33 \text{ cm}^3 = 11,404 \text{ m}^3.$$

DISTRIBUCION DE LA CARGA MOLIENTE
(Bolas de Acero al Mn)

Diámetro de bolas (n)	Molienda Primaria				Molienda Secundaria				Molienda Terciaria			
	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas	Peso (%)	Peso 1 bola (Kg.)	Peso total bolas (Kg.)	# de bolas
4,5	16,0	6,09	3554	583								
4,0	30,0	4,28	6663	1558								
3,5	21,5	2,87	4775	1666								
3,0	14,0	1,80	3109	1723	26,0	1,80	5774	3199				
2,5	9,1	1,04	2201	1936	36,0	1,04	7995	7658				
2,0	5,4	0,53	1199	2243	22,0	0,53	4886	9138				
1,5	2,4	0,23	533	2359	9,2	0,23	2043	9041				
1,25	1,6	0,13	355	2723	3,2	0,13	711	5446	30,0	0,13	6663	51056
1,0					1,7	0,07	378	5635	32,0	0,07	7107	106074
0,875					1,9	0,05	422	9377	14,5	0,05	3220	71563
0,75									23,5	0,03	5219	185077

(Los datos en negritas son datos proporcionados)

Calculamos el volumen de la carga:

$$V_{\text{carga}} = 11'403.981,33 \times 0,5 = 5'701.990,7 \text{ cm}^3 = 5,702 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Mineral}} = V_{\text{Bolas}} = 5'701.990,7 \times 0,5 = 2'850.995,35 \text{ cm}^3 = 2,851 \text{ m}^3$$

Haciendo uso de (2), calculamos el peso tanto del mineral como de las bolas

$$\text{El peso total de las bolas será} = 2'850.995,35 \times 7,79 = 22'209.253,78 \text{ g} = 22209,25 \text{ Kg}$$

Para calcular el peso del mineral, debemos antes determinar su densidad, para poder aplicar (2).

De acuerdo a la composición del mineral, si asumimos 1,0 g de mineral, cada especie tendría el peso siguiente:

$$\begin{aligned} \text{CuFeS}_2 &= 0,0186 \text{ g} \\ \text{Cu}_2\text{S} &= 0,0018 \text{ g} \\ \text{CuO} &= 0,0005 \text{ g} \\ \text{FeS}_2 &= 0,3684 \text{ g} \\ \text{PbS} &= 0,0218 \text{ g} \\ \text{ZnS} &= 0,0114 \text{ g} \\ \text{SiO}_2 &= 0,5775 \text{ g} \end{aligned}$$

Aplicando (2), calculamos el volumen que ocupan los pesos respectivos de estas especies.

Volumen de:

$$\begin{aligned} \text{CuFeS}_2 &= 0,0186/4,2 = 0,0044 \text{ cm}^3 \\ \text{Cu}_2\text{S} &= 0,0018/5,7 = 0,0003 \text{ cm}^3 \\ \text{CuO} &= 0,0005/6,1 = 0,0001 \text{ cm}^3 \\ \text{FeS}_2 &= 0,3684/4,51 = 0,0817 \text{ cm}^3 \\ \text{PbS} &= 0,0218/7,58 = 0,0029 \text{ cm}^3 \\ \text{ZnS} &= 0,0114/4,0 = 0,0029 \text{ cm}^3 \\ \text{SiO}_2 &= 0,5775/2,65 = 0,2179 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen que ocupa 1,0 g de mineral} = 0,3102 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad del mineral} = 1/0,3102 = 3,224 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{El peso del mineral será} = 2'850.995,35 \times 3,224 = 9'191.609 \text{ g}$$

$$W_{\text{Mineral}} = 9191,6 \text{ Kg. (2-1)}$$

2.

La tabla la podemos rellenar, haciendo uso de las ecuaciones (1), (2) y (3). Hagamos el cálculo para una de las especies de bolas, estableciendo que para las demás se procede de manera similar

$$\text{Sea la bola de diámetro} = 4,5 \text{ pulgadas} = 11,43 \text{ cm.}$$

$$V_{4,5} = (4.3)\pi(11.43.2)^3 = 781.87 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de 1 bola} = 781.87 \times 7.79 = 6090.77 \text{ g} = 6.091 \text{ Kg. (2-2)}$$

$$\text{Peso total de estas bolas} = 22209.25 \times 0.16 = 3553.48 \text{ Kg. (2-2)}$$

$$\text{Número de estas bolas} = 3553.48 / 6.091 = 583 \text{ (2-2)}$$

Además de los datos proporcionados, en la tabla también aparecen en **negritas**, en la primera fila, los valores que acabamos de calcular (2-2)

EJERCICIO N° 3

Se tiene un mineral de la composición siguiente:

$$\text{CuFeS}_2 = 3.58\% (4.20)$$

$$\text{FeS}_2 = 18.27\% (4.51)$$

$$\text{PbS} = 3.00 (7.58)$$

$$\text{SiO}_2 = 75.15\% (2.65)$$

Este mineral se debe moler, hasta la granulometría adecuada para concentrar la calcopirita por flotación.

Se utiliza un molino de bolas cilíndrico de 1.8 m de diámetro interior y 2.0 m de longitud. (ver Fig. 1).

El nivel del régimen de carga del molino, se encuentra a 1.05 m y se muestra en la figura 2.

La distribución de la carga moliente (bolas de acero al Mn), es la siguiente.

DISTRIBUCION DE LA CARGA MOLIENTE DEL MOLINO

DATOS PROPORCIONADOS		DATOS CALCULADOS		
Diámetro (m)	Peso (%)	Peso 1 bola (kg)	Peso total bolas (kg)	# de bolas
1.0	38.0	0.5317	3765.37	7042
0.5	35.0	0.2256	3468.11	15373
0.25	3.0	0.1305	1288.15	9871
0.1	6.4	0.0670	634.17	9465
0.0875	3.1	0.0448	307.18	6857
0.075	4.5	0.0282	445.90	5812

Si la carga moliente debe ocupar el 25% de la capacidad volumétrica del molino.

PREGUNTAS

1. Determinar el porcentaje de la capacidad del molino, ocupada por la carga (mineral mas molientes).

2. Determinar los pesos del mineral y de la carga moliente, a la vez que sus porcentajes en volumen y en peso.

3. Determinar el número de bolas a cargar.

4. Calcular la velocidad crítica del molino.

SOLUCION

1.

Para este cálculo, vamos a hacer uso de las figuras (1), (2), (3) y (4), que se muestran en la página siguiente.

Sea:

ϕ_i = diámetro interior del molino = 1.8 m (Fig. 2)

l = nivel del régimen de carga, incluido el radio del molino

K = nivel del régimen de carga, excluido el radio del molino

r = radio interno del molino.

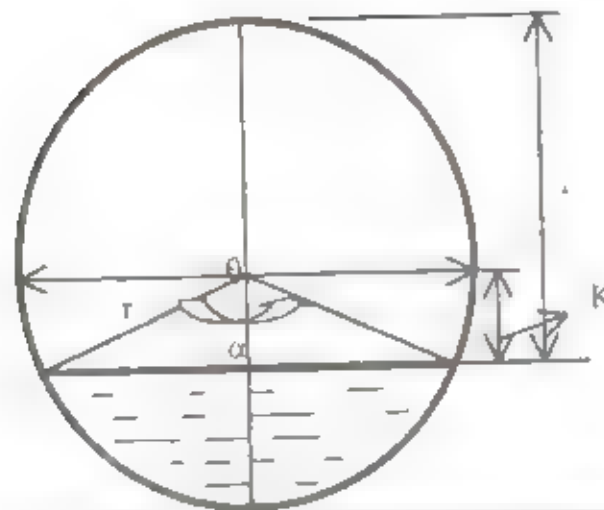


Figura N° 2. Sección del Molino, mostrando el Nivel del Regimen de Carga
 Área Rayada = $\frac{1}{2} r^2 (\alpha - \text{Sen } \alpha)$ (4)

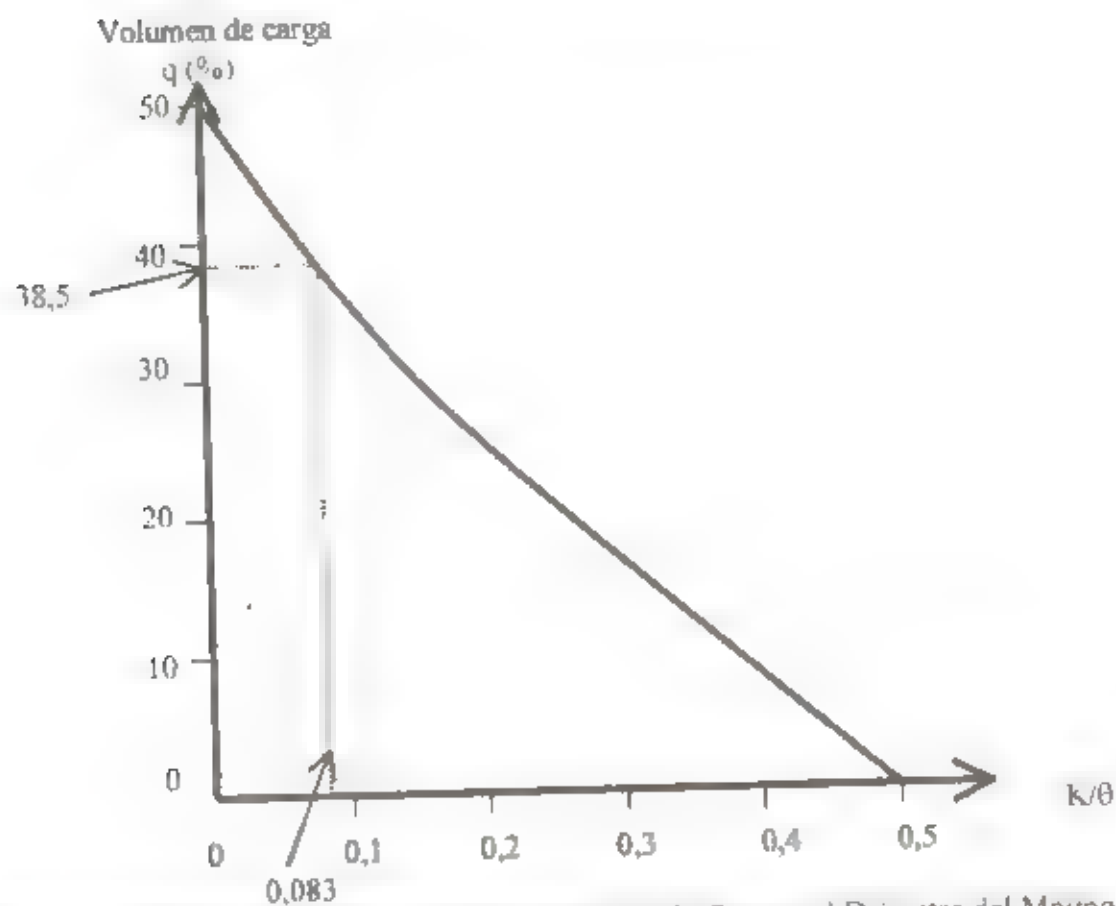


Figura N° 3 Relacion entre el Volumen de Carga, el Nivel de Carga y el Diámetro del Molino

En el gráfico de la Fig. 2, se cumple que:

$$1 = r + K \quad (5)$$

$$K/\theta = (1/\theta - 0,5) \quad (6)$$

Despejando de (5) $K = 1 - r = 1,05 - 1,8/2 = 0,15 \text{ m}$

Sustituyendo en (6) $K/\theta = 0,15 / 1,8 = 0,083$

De la Fig.3, para $K/\theta = 0,083$, $q = 38,5\%$

Por tanto, si $q = \%$ de la carga en volumen, el mineral + molientes, ocupan el 38,5% de la capacidad del molino (3-1)

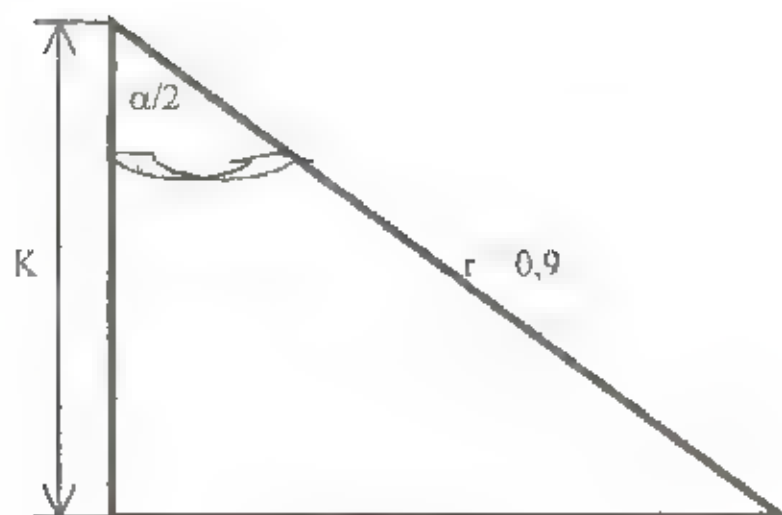


Figura N° 4

2.

Para este cálculo, en primer lugar determinar la densidad del mineral, así:

Supongamos 1 gramo de mineral y determinemos que peso le corresponde a cada especie.

$$\text{CuFeS}_2 = 0,0385 \text{ g}$$

$$\text{FeS}_2 = 0,1827 \text{ g}$$

$$\text{PbS} = 0,0300 \text{ g}$$

$$\text{SiO}_2 = 0,7515 \text{ g}$$

Haciendo uso de (2), se puede determinar el volumen (cm^3) que ocupa 1 gramo de este mineral.

$$\text{CuFeS}_2 = 0,0358/4,2 = 0,0085 \text{ cm}^3$$

$$\text{FeS}_2 = 0,1827/4,51 = 0,0405 \text{ cm}^3$$

$$\text{PbS} = 0,0300/7,58 = 0,0040 \text{ cm}^3$$

$$\text{SiO}_2 = 0,7515/2,65 = 0,2836 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ gramo de mineral ocupa un volumen } 0,3366 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad del mineral} = 1 / 0,3366 = 2,971 \text{ g/cm}^3$$

En segundo lugar, debemos determinar el volumen de la carga, para lo cual debemos calcular el área rayada con la ayuda de (4); pero como necesitamos el ángulo α , este lo podemos determinar a partir de la Fig. 4.

$$\cos \alpha/2 = K/r = 0,15/0,9 \therefore \alpha/2 = 80,405 \therefore \alpha = 160,81^\circ$$

$$1^\circ = \pi / 180 \text{ rad.}, 1 \text{ rad} = 180^\circ / \pi$$

$$\text{Área rayada} = \frac{1}{2} \times (0,9)^2 \times ((\pi(160,81/180)) - \sin 160,81)) = 1,0036 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen de la carga} = 1,004 \times 2 = 2,007 \text{ m}^3$$

$$\text{Capacidad volumétrica del molino} = \pi \times (1,8/2)^2 \times 2 = 5,089 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de carga moliente} = 5,089 \times 0,25 = 1,272 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del mineral} = 2,007 - 1,272 = 0,735 \text{ m}^3 = 735000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso del mineral} = 735000 \times 2,971 = 2'183.685 \text{ g} = 2183,7 \text{ Kg. (3-2)}$$

Dado que las bolas son de acero al Mn, su densidad es $7,79 \text{ g/cm}^3$

$$\text{Peso de la carga moliente} = 1'272.000 \times 7,79 = 9'908.880 \text{ g} = 9908,88 \text{ Kg. (3-2)}$$

(Con relación al volumen interior del molino, la carga se distribuyó así (3-2))

$$\text{Mineral} = 0,735 \text{ m}^3 = 14,44\%$$

$$\text{Bolas} = 1,272 \text{ m}^3 = 25,00\%$$

$$\text{Vacío} = 3,082 \text{ m}^3 = 60,56\%$$

$$5,089 \text{ m}^3 = 100,00\%$$

La distribución de la carga en peso y volumen, se muestra en el cuadro siguiente.

ESPECIE	DISTRIBUCION DE LA CARGA			
	PESO		VOLUMEN	
	(kg)	(%)	(m ³)	(%)
Mineral	2183.7	18.06	0.735	36.62
Bolas	9908.9	81.94	1.272	63.38
Totales	12092.6	100.00	2.007	100.00

3

Para este cálculo, procedemos como en los ejercicios anteriores por ejemplo, dado que disponemos, según la tabla, de "DATOS PROPORCIONADOS", realicemos el cálculo para la primera columna de la tabla:

Diámetro de la bola = 2 pulgadas = 5.08 cm

Volumen de una bola = $\frac{4}{3}\pi(5.08/2)^3 = 68.642 \text{ m}^3$

Peso de una bola = $68.642 \times 7.79 = 534.721 \text{ g}$

Peso total de las bolas de esta especie = $9908.88 \times 0.38 = 3765.37 \text{ Kg}$

de bolas = $3765.37 / 0.5347$

7042

Procediendo así con todas las especies y sumando, al final resulta

Número de bolas a cargar = 64420 (3-3)

4.

Este cálculo lo realizamos con base en la expresión siguiente:

$$\eta_c = 29.9 \sqrt{\frac{1}{r - R}} \quad (7)$$

donde

η_c = velocidad crítica del molino (r.p.m.)

r = radio interno del molino (m)

R = radio de la partícula esférica (m)

Realicemos el cálculo para los tamaños mayor y menor de las bolas que aparecen entre los "DATOS PROPORCIONADOS" de la tabla:

$R_1 = 2 \text{ pulgadas} = 5.08 \text{ cm} = 0.0508 \text{ m}$

$$\eta_{c1} = 29.9 \sqrt{\frac{1}{0.9 - \frac{0.0508}{2}}} = 31.97 \text{ r.p.m. (3-4)}$$

$R_2 = 0.75 \text{ pulgadas} = 1.905 \text{ cm} = 0.01905 \text{ m}$

$$\eta_{c2} = 29.9 \sqrt{\frac{1}{0.9 - 0.0095}} = 31.68 \text{ r.p.m. (3-4)}$$

Como puede verse, aunque las velocidades son parecidas, la velocidad crítica calculada para las bolas de mayor tamaño, siempre será mayor que las de tamaño menor. Estas resultarían centrifugadas con las velocidades críticas de las mayores, por lo que en una mezcla de bolas de tamaños diferentes, se debe realizar la molienda a las velocidades requeridas por las bolas de tamaño menor. En este caso, **31.68 r.p.m. (3-4)**.

EJERCICIO N° 4

PREGUNTAS

1. Dado un tamiz de la Serie Normal Tyler cuya luz o abertura es de 0.0737 mm, y el diámetro del alambre con que es fabricado es de 0.0533 mm, calcular el número de mailas o # mesh, por pulgada lineal de 25.5 mm.

2. La abertura de un tamiz de la Serie Normal Tyler es de 0.0737 mm. Calcular el número mesh del tamiz que le precede, si el diámetro del alambre con que es fabricado es de 0.0652 mm.

La abertura o luz de un tamiz de la Serie Tyler Normal es de 0,1041 mm. Calcular el número de mallas de tamiz que le precede, si el diámetro del alambre con que es fabricado es de 0,1067 mm.

4. La abertura o luz de un tamiz es de 0,1041 mm. Calcular el número mesh del tamiz que es dos veces anterior a él en la Serie Tyler Normal, si el alambre con que es fabricado es de 0,1825 mm.

5. El tamiz # 20 tiene una abertura de 0,8331 mm. Si en la Serie Tyler Normal, el tamiz que le precede es el # 14, calcular el diámetro del alambre con que es fabricado este último.

SOLUCION

1.

La solución a las preguntas de este ejercicio, vamos a encontrarla mediante la introducción de una expresión que correlacione el número de mallas, la luz o abertura y el diámetro del alambre.

Sea:

A = luz ó abertura de un orificio del tamiz (mm)

B = diámetro del alambre con que se construye el tamiz (mm)

n = número de mallas que posee el tamiz por pulgada lineal de 25,4 mm

Al ordenar los parámetros anteriores, debe cumplirse que:

$$nA + nB = 25,4 \text{ mm} \quad (8)$$

En este caso, $A = 0,0737 \text{ mm}$, $B = 0,0533 \text{ mm}$

$$n = 25,4 / (A+B)$$

$$n = 25,4 / (0,0737+0,0533) = 200 \quad (4-1)$$

2.

En la Serie Normal Tyler, la base es el tamiz de malla 200, y la abertura de cualquier tamiz es la misma del inmediatamente anterior multiplicada por $\sqrt{2}$.
Haciendo uso de (8), si denominamos con subíndice (1) al tamiz inmediatamente superior al de partida (le precede), tendremos:

$$A_1 = 0,0737 (2)^{1/2} \text{ mm}, B_1 = 0,0652 \text{ mm}$$

$$n = 25,4 / (A_1+B_1) = 25,4 / (0,1042+0,0652) = 149,9$$

$$n = 150 \quad (4-2)$$

3.

En este caso: $A_1 = 0,1041 \sqrt{2} \text{ mm}$, $B_1 = 0,1067 \text{ mm}$

$$n = 25,4 / (0,1472+0,1067) = 100$$

$$n = 100 \quad (4-3)$$

4.

En este caso, dado que el tamiz está ubicado 2 posiciones por encima del de referencia

$$A_2 = 0,1041 \times \sqrt{2} \times \sqrt{2} \text{ mm}$$

$$B_2 = 0,1825 \text{ mm}$$

$$n = 25,4 / (0,2082+0,1825) = 65$$

$$n = 65 \quad (4-4)$$

5.

En este caso:

$$n_1 = 14$$

$$A_1 = 0,8331 \times (2)^{1/2} \text{ mm}$$

$$B_1 = (25,4 - 14 \times 1,1781) / 14 = 0,636 \text{ mm}$$

$$B_1 = 0,636 \text{ mm} \quad (4-5)$$

EJERCICIO N° 5

PREGUNTAS

1. Se denomina característica de una criba o tamiz (1), y en general, de una superficie cualquiera con orificios a la superficie que estos representan con respecto a la superficie total, generalmente, expresada en (%).

En base a la definición anterior, calcular la característica del tamiz # 3, si el diámetro del alambre con que es fabricado este tamiz es de 1 802 mm y la luz de la malia es de 6,665 mm (ver Fig. 5).

SOLUCION

B

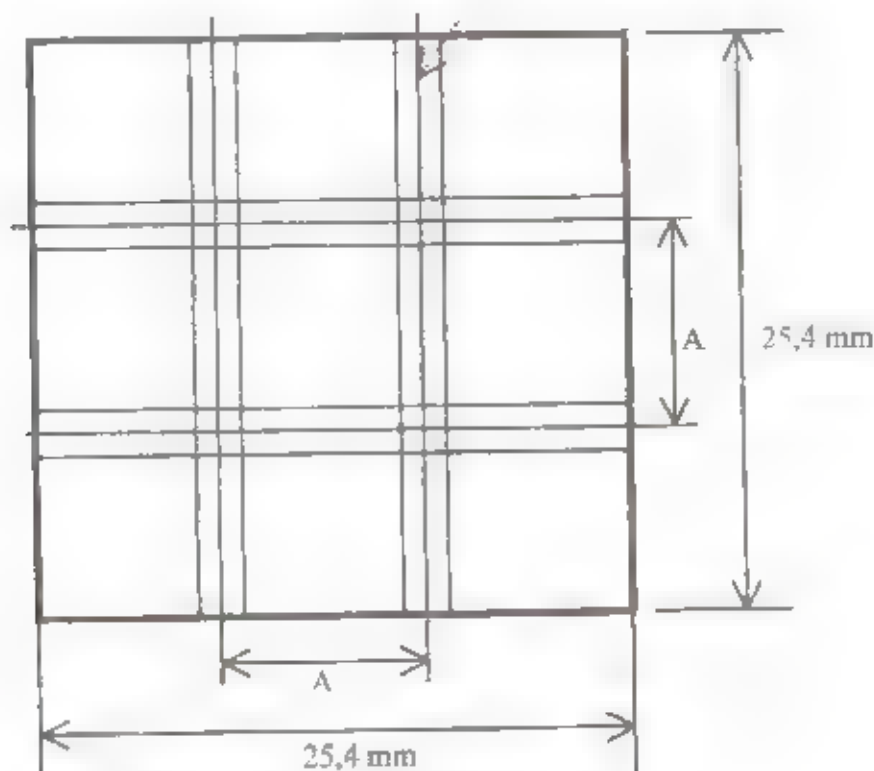


Figura N° 5- Esquema de un Tamiz (N° 3)

Sea

S = superficie total (Fig. 5)

S_i = Superficie de los orificios

C = Característica

n = # del tamiz

Se cumple que :

$$C = \frac{S_i}{S} \times 100 = \frac{A^2 \cdot n^2}{(25,4)^2} \times 100 \quad (9)$$

Dando valores a (9).

$$C = \frac{(6,665)^2 \times 3^2}{(25,4)^2} \times 100 = 62,0\%$$

$$C = 62,0\% (S-1)$$

EJERCICIO N° 6

En la Serie Normal Tyler, el tamiz 200 tiene una luz de malia de 0,0737 mm, y el alambre con que es fabricado tiene un diámetro de 0,0533 mm.

PREGUNTAS

1. Calcular el diámetro del alambre necesario para fabricar el tamiz # 14, si este se encuentra fabricado 8 posiciones por encima del # 200 (ver Figuras N° 6 y 6).

2. Calcular la característica de este tamiz.
3. Comparar las características de estas dos mallas.

SOLUCION

6
8
10
14
20
28
35
48
65
100
150
200
270
Fondo

Figura N° 6: Serie Normal de Tamices Tyler

1.

En la ecuación (8), nos piden calcular B (ver Fig. 6') conociendo $n = 14$, pero desconociendo A, la cual determinaremos con ayuda de la expresión (10):

$$A_p = A_0(\sqrt{2})^p \quad (10)$$

donde

p = posición del tamiz r respecto del tamiz base

A_0 = luz ó abertura del tamiz base (malla 200)

Así :

$$A = (0,0737)(\sqrt{2})^p = 1,1792 \text{ mm}$$

$$B = (25,4 - nA)/n = (25,4 - 14 \times 1,1792) \div 14 = 0,6351 \text{ mm}$$

$$B = 0,6351 \text{ mm (6-1)}$$

2.

Para calcular la característica del tamiz de malla 14, utilizamos (9)

$$C_{14} = ((1,1792)^2 \times 14 \times 14 + (25,4)^2) \times 100 = 42,24$$

$$C_{14} = 42,24\% \text{ (6-2)}$$

3.

$$C_{200} = ((0,0737)^2 (200)^2 \div (25,4)^2) \times 100 = 33,86\%$$

$$C_{200} < C_{14} \text{ (6-3)}$$

La característica de un tamiz disminuye a medida que aumenta el número del tamiz en virtud de que la luz se hace más pequeña con una razón geométrica de $(2)^p$ para tamices consecutivos.

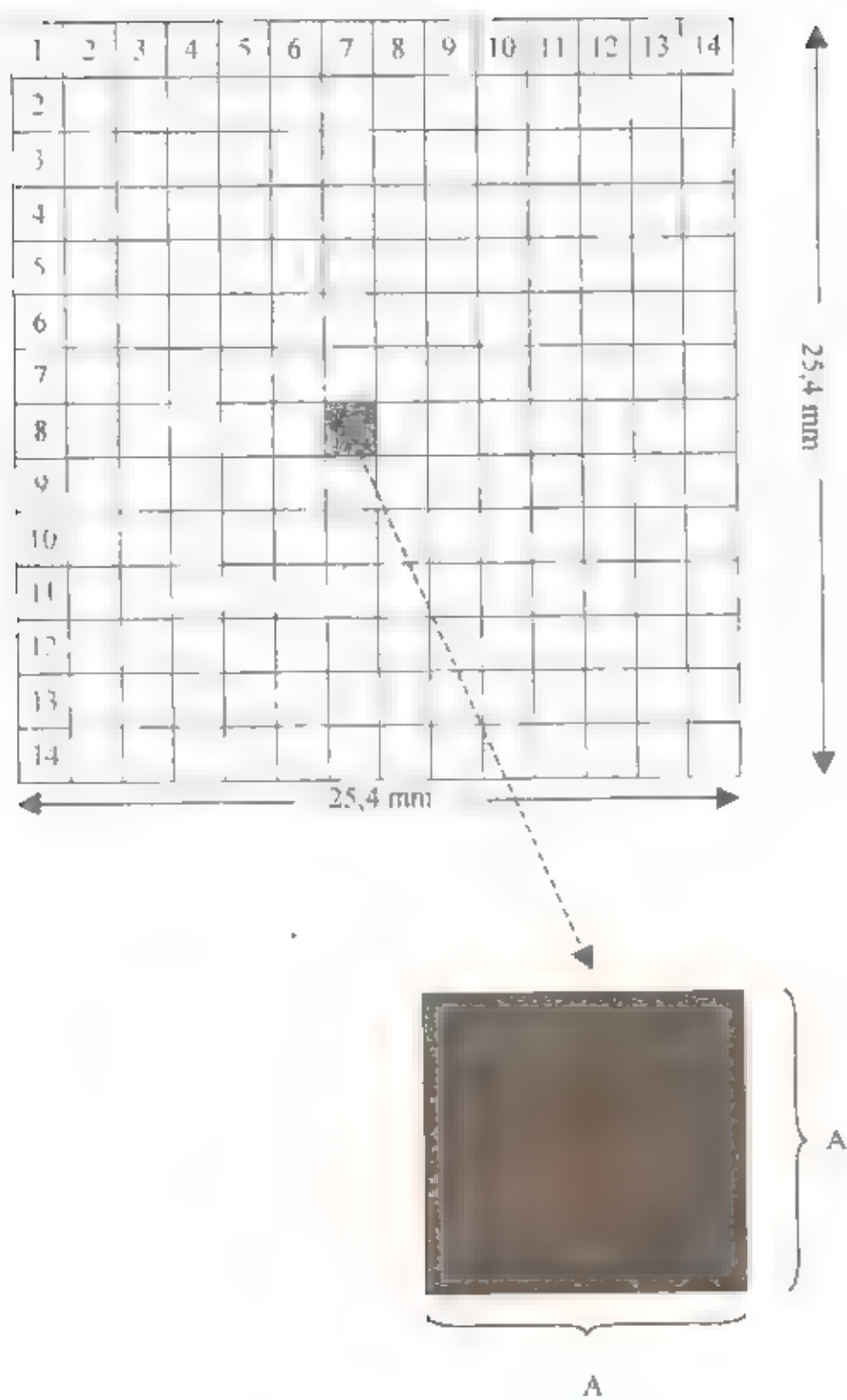


Figura N°6: Esquema del Tamiz # 14 (Serie Normal Tyler).

EJERCICIO N° 7

La característica de un tamiz Tyler Normal, es de 61,95% y se encuentra 11 posiciones por encima de tamiz de malla 200 que tiene una luz de 0,0737 mm

PREGUNTAS

1. Calcular la luz de dicho tamiz.
2. Determinar el número de mallas del tamiz.
3. Calcular el diametro del alambre con que se ha de fabricar dicho tamiz

SOLUCION

1.

Con la ayuda de (10), podemos calcular A, ya que conocemos $A_0 = 0,0737$ mm, y $p = 11$

Asi:

$$A = 0,0737 [(2)^{1/2}]^{11} = 3,335$$
$$A = 3,335 \text{ mm (7-1)}$$

2.

Para este cálculo, utilizamos la ecuación (9):

$$A = 3,335$$

$$C_m = 61,95\%, \text{ asi:}$$

$$n = [(0,6195 \times (25,4)^2 / (3,335)^2)^{1/2}] = 5,9945$$
$$n = 6 \text{ (7-2)}$$

3. En este caso, aplicamos (8).

$$A = 3,335 \text{ mm}$$

$$n = 6$$

$$B = (25,4 - 6 \times 3,335) + 6 = 0,8983$$
$$B = 0,8983 \text{ mm (7-3)}$$

EJERCICIO N° 8

PREGUNTAS

1. A cuantas posiciones por encima del tamiz de malla 200, se encuentra un tamiz con 1,168 mm de luz en la Serie Tyler Normal ?.

2. La misma pregunta anterior, pero si el tamiz tiene de abertura 0,295 mm en la Serie Tyler Doble.

SOLUCION

1.

La Serie Tyler se caracteriza porque tiene como base el tamiz 200, con una luz de 0,0737 mm y ademas, las aberturas entre tamices consecutivos cambian con una razon geometrica de $(2)^{1/4}$ en la Serie Normal y con una razón de $(2)^{1/2}$ en la Serie Doble

Para este cálculo vamos a utilizar la ecuación (10):

$$A_p = A_0 (\sqrt{2})^p$$

logaritmando y despejando:

$$p = \frac{\ln A_p - \ln A_0}{\ln \sqrt{2}}$$

$$p = (\ln 1,168 - \ln 0,0737) / \ln (2)^{1/2} = 7,792$$

$$p = 8 \text{ posiciones por encima del tamiz 200 (8-1)}$$

2.

Para este caso, aplicamos la siguiente ecuación:

$$A_p = A_0 (\sqrt[4]{2})^p \quad (11)$$

Sacando logaritmos y despejando:

$$p = \frac{\ln A_p - \ln A_0}{\ln(\sqrt[4]{2})}$$

$$p = (\ln 0.295 - \ln 0.0737) / \ln(2)^{1/4} = 8$$

p = 8 posiciones por encima del tamiz de malla 200 en la Serie Tyler Doble (8-2)

EJERCICIO N° 9

Los tamices numero 8 y 35, se encuentran ubicados 10 posiciones por encima del tamiz 200, en las series Tyler Normal y Doble; respectivamente (Fig. 6)

PREGUNTAS

1. Comparar la luz de c/u de estos tamices.
2. Comparar los diámetros de los alambres con que son fabricados c/u de estos tamices
3. Comparar las características de estos tamices.
4. A cuantas posiciones por debajo de la malla # 8, se encuentra ubicada la 35?

SOLUCION

1

Sea

 $A_{N,i}$ = luz del tamiz "i" en la Serie Tyler Normal $A_{D,i}$ = luz del tamiz "i" en la Serie Tyler Doble

p = posición del tamiz, respecto al tamiz base (malla 200).

Aplicando (10)

$$A_{N,8} = 0,0737 \times [(2)^{1/2}]^{10} = 2,3684 \text{ mm}$$

Aplicando (11):

$$A_{D,35} = 0,0737 \times [(2)^{1/4}]^{10} = 0,4169 \text{ mm}$$

$$A_{N,8} > A_{D,35} \quad (9-1)$$

2.

Reestructuremos la expresión (8) de la siguiente manera:

$$n_N A_N + n_N B_N = 25,4 \quad (8.1)$$

$$n_D A_D + n_D B_D = 25,4 \quad (8.2)$$

los subíndices N y D se refieren a las condiciones Normal y Doble, respectivamente, por tanto:

$$B_{N,8} = (25,4 - 8 \times 2,3684) / 8 = 0,8166 \text{ mm}$$

$$B_{D,35} = (25,4 - 35 \times 0,4169) / 35 = 0,3088 \text{ mm}$$

$$B_N > B_D \quad (9-2)$$

3.

Utilizando (9):

$$C_8 = [(2,3684)^2 \times (8)^2 / (25,4)^2] \times 100 = 55,18\%$$

$$C_{35} = [(0,4169)^2 \times (35)^2 / (25,4)^2] \times 100 = 33,00\%$$

$$C_8 > C_{35} \quad (9-3)$$

4

En este caso, la malla 35 es la malla de referencia, por tanto, si adaptamos la ecuación (11), tendremos:

$$A_8 = A_{35} \{ (2)^{1/4} \}^p$$

Logaritmando y despejando tendremos:

$$p = \frac{1}{\ln \sqrt[4]{2}} \times \ln \frac{2,3684}{0,4169} = 10$$

La malla 35, se encuentra 10 posiciones por debajo de la 8 en Serie Doble (9-4)

EJERCICIO N° 10

En la serie de tamices inglesa I M M (Institution of Mining and Metallurgy), el # mesh se expresa en mallas por pulgada lineal de 25,4 mm.

En esta serie, el diámetro del alambre es igual a la luz de la malla y la superficie clasificadora es aproximadamente igual al 25% en todas las cribas y tamices.

PREGUNTAS

1. Calcular la luz de la malla para el tamiz # 5.
2. Calcular el # mesh para una malla de 0,2540 mm de luz.
3. Calcular la superficie clasificadora, para las mallas anteriores

SOLUCION

1. En este caso, la ecuación (8) se transforma, ya que $A = B$.

$$\begin{aligned} nA + nB &= 25,4 \\ 2nA &= 2nB = 25,4 & (12) \\ A &= 25,4/2n = 25,4/2 \times 5 = 2,540 \\ A &= 2,540 \text{ mm} & (10-1) \end{aligned}$$

2. despejando de (12):

$$\begin{aligned} n &= 25,4/0,254 = 50 \\ n &= 50 & (10-2) \end{aligned}$$

3. aplicando (9):

$$\begin{aligned} \text{Caso (1.): } C_5 &= \{(2,54)^2(5)^2/(25,4)^2\} \times 100 = 25\% & (10-3) \\ \text{Caso (2.): } C_{50} &= (0,254)^2(50)^2/(25,4)^2 \times 100 = 25\% & (10-3) \end{aligned}$$

EJERCICIO N° 11

Para la serie de tamices U. S. Standard, que tiene como base el tamiz # 18 (1,00 mm de luz), la razón entre tamices consecutivos es $(2)^{1/4}$

PREGUNTAS

1. Calcular las aberturas para las mallas inmediatamente superior, e inmediatamente inferior a la malla 18.
2. Calcular las aberturas para las mallas ubicadas 5 posiciones por encima, y 5 posiciones por debajo de la malla 18.
3. A partir de la malla ubicada 5 posiciones por debajo, deducir la luz de la ubicada 5 posiciones por encima de la malla # 18.

SOLUCION

- 1.

Aplicando (11), y teniendo en cuenta que para la malla inmediatamente superior a la 18, $p = 1$ y para la inmediatamente inferior, $p = -1$, tendremos:
Para la malla inmediatamente superior:

$$A_1 = 1,0 \times (2)^{1/4} = 1,1892 \text{ mm} \quad (11-1)$$

Para la malla inmediatamente inferior:

$$A_{-1} = 1/(2)^{1/4} = 0,8409 \text{ mm} \quad (11-1)$$

- 2.

De nuevo aplicamos (11), para $p = 5$ y $p = -5$:

$$A_5 = 1,0 \times (2)^{5/4} = 2,3784 \text{ mm} \quad (11-2)$$

$$A_{-5} = 1/[(2)^{5/4}] = 0,4204 \text{ mm} \quad (11-2)$$

3.

Aplicamos (10), tomando como referencia la malla 5 puestos por debajo de la 18, la expresión quedaría así.

$$A_5 = A_{18} \{(2)^{1/4}\}^{10}$$

$$A_5 = 0.4204 \times \{(2)^{1/4}\}^{10} = 2.3784 \text{ mm (11-3)}$$

EJERCICIO N° 12

PREGUNTAS

Elaborar una serie de tamices normalizada, utilizando para ella los datos siguientes

1) Base de la serie, un tamiz con una luz de 1,0 mm.

2) Expresar el # de mallas por pulgada de 25,4 mm.

3) Utilizar como razón, la relación de densidades en el agua entre la calcopirita y el grafito.

4) El diametro del alambre con que se fabrica un tamiz es igual a 1/4 de la luz de la malla

SOLUCION

Sr.

R = razón progresión geométrica Relación de densidades en el agua

d = densidad del grafito = 2,2 g/cm³

D = densidad de la calcopirita = 4,2 g/cm³:

$$R = \frac{D-1}{d-1} \quad (13)$$

$$R = (4,2-1) / (2,2-1) = 2,6667$$

Para una serie normalizada debe cumplirse (8).

Primero elaboramos la serie en sentido ascendente a partir de la base

Tamiz base:

$$A = 1,0 \text{ mm}, B = 0,25 \text{ mm}$$

$$n_0 = 25,4 / (A+B) = 25,4 / (1+0,25) = 20,32 \approx 20$$

La expresión (10), toma ahora la forma:

$$A_p = A_0 R^p \quad (14)$$

Si p = 1:

$$A_1 = 1,0 \times (2,6667)^1 = 2,6667 \text{ mm}$$

$$B_1 = 0,25 \times 2,6667 = 0,6667 \text{ mm}$$

$$n_1 = 25,4 / (2,6667 + 0,6667) = 7,62 \approx 8$$

Si p = 2:

$$A_2 = 1,0 \times (2,6667)^2 = 7,1113 \text{ mm}$$

$$B_2 = 7,1113 \times 0,25 = 1,7778 \text{ mm}$$

$$n_2 = 25,4 / (7,1113 + 1,7778) = 2,86 \approx 3$$

Si p = 3:

$$A_3 = 1,0 \times (2,6667)^3 = 18,9637 \text{ mm}$$

$$B_3 = 0,25 \times 18,9637 = 4,741 \text{ mm}$$

$$n_3 = 25,4 / (18,9637 + 4,741) = 1,07 \approx 1$$

Si p = 4:

$$A_4 = 1,0 \times (2,6667)^4 = 50,5705 \text{ mm}$$

$$B_4 = 0,25 \times 50,5705 = 12,6426 \text{ mm}$$

$$n_4 = 25,4 / (50,5705 + 12,6426) = 0,4$$

Serie en sentido decreciente a partir de la base:

Si p = -1:

$$A_{-1} = 1,0 \times (2,6667)^{-1} = 0,375 \text{ mm}$$

$$B_{-1} = 0,25 \times 0,375 = 0,09375 \text{ mm}$$

$$n_{-1} = 25,4 / (0,375 + 0,09375) = 54,2 \approx 54$$

Si $p = -2$

$$A_2 = 1,0 \times (2,6667)^2 = 0,1406 \text{ mm}$$

$$B_2 = 0,25 \times 0,1406 = 0,0352 \text{ mm}$$

$$n_2 = 25,4 / (0,1406 + 0,0352) = 144,5 \approx 155$$

Si $p = -3$

$$A_3 = 1,0 \times (2,6667)^3 = 0,0527 \text{ mm}$$

$$B_3 = 0,25 \times 0,0527 = 0,0132 \text{ mm}$$

$$n_3 = 25,4 / (0,0527 + 0,0132) = 385,5 \approx 386$$

Los valores que se acaban de calcular, aparecen en la tabla siguiente:

SERIE DE CRIBAS Y TAMICES NORMALIZADA

Tamiz N°	LUZ DE LA MALLA			Diametro del alambre (mm)
	Pulgadas	(mm)	Micras (mm $\times 10^{-3}$)	
0.4	1,9910	50,5705		12,6426
1	0,7466	18,9637		4,7409
3	0,2800	7,1113		1,7778
8	0,1050	2,6667		0,6667
20	0,0394	1,0000	1000	0,2500
54	0,0148	0,375	375	0,0938
145	0,0055	0,1406	140,6	0,0352
386	0,0026	0,0527	52,7	0,0132

EJERCICIO N° 13

PREGUNTAS

Elaborar una serie de tamices normalizada con su complementaria, utilizando para ello los siguientes datos:

- 1) Base de la serie, un tamiz con una luz de 0,50 mm
- 2) Expresar el número del tamiz, en mallas por pulgada inglesa (25,4 mm)
- 3) Utilizar como razón para la progresión geométrica, la relación de densidades entre el agua entre la calcopirita (4,2) y el cuarzo (2,65).
- 4) El diámetro del alambre con que se fabrica el tamiz, es igual a $\frac{1}{4}$ de la luz de la malla.

SOLUCION

Este ejercicio es similar al # 12, con la diferencia de que se solicita adicionar una serie complementaria. Por lo tanto, para la serie normal procedemos del mismo modo que en el ejercicio anterior: apoyados en las expresiones (8), (13) y (14):

Serie normalizada:

De acuerdo con (13):

$$R = \text{progresión geométrica} = (D-1)/(d-1) = (4,2-1)/(2,65-1) = 1,9394$$

Para el tamiz base, y aplicando (14) y (8):

Si $p = 0$:

$$A_0 = 0,50 \text{ mm}$$

$$B_0 = 0,25 \times 0,5 = 0,125 \text{ mm}$$

$$n_0 = 25,4 / (0,5 + 0,125) = 40,64 \approx 41$$

Serie normalizada creciente:

Si $p = 1$:

$$A_1 = 0,5 \times (1,9394)^1 = 0,9697 \text{ mm}$$

$$B_1 = 0,25 \times 0,9697 = 0,2424 \text{ mm}$$

$$n_1 = 25,4 / (0,9697 + 0,2424) = 20,95 \approx 21$$

Si $p = 2$:

$$A_2 = 0,5 \times (1,9394)^2 = 1,8806 \text{ mm}$$

$$B_2 = 0,25 \times 1,8806 = 0,4702 \text{ mm}$$

$$n_2 = 25,4 / (1,8806 + 0,4702) = 10,8 \approx 11$$

De esta misma manera se realizaron los cálculos para el resto de los tamices en la serie ascendentes que aparecen en la tabla.

Serie normalizada decreciente:

Si $p = -1$

$$\begin{aligned} A_{-1} &= 0,5 \times (1,9394)^{-1} = 0,2578 \text{ mm} \\ B_{-1} &= 0,25 \times 0,2578 = 0,0645 \text{ mm} \\ n_{-1} &= 25,4 / (0,2578 + 0,0645) = 78,8 \approx 79 \end{aligned}$$

Si $p = -2$:

$$\begin{aligned} A_{-2} &= 0,5 \times (1,9394)^{-2} = 0,1329 \text{ mm} \\ B_{-2} &= 0,25 \times 0,1329 = 0,0332 \text{ mm} \\ n_{-2} &= 25,4 / (0,1329 + 0,0332) = 152,9 \approx 153 \end{aligned}$$

De esta misma manera, se realizaron los demás cálculos para el resto de la serie de tamices decrecientes que aparecen en la tabla.

Serie intermedia o complementaria:

En este caso, la expresión (14) toma la siguiente forma:

$$A_f = A_0 R^f \quad (15)$$

Donde

$$f = p + A_0 \quad (16)$$

f = posición complementaria de " p "

Serie complementaria creciente:

Si $p = 0$, $f = 0,5$.

$$\begin{aligned} A_{0,5} &= 0,5 \times (1,9394)^{0,5} = 0,6963 \text{ mm} \\ B_{0,5} &= 0,25 \times 0,6963 = 0,1741 \text{ mm} \\ n_{0,5} &= 25,4 / (0,6963 + 0,1741) = 29,18 \approx 29 \end{aligned}$$

Si $p = 1$, $f = 1,5$:

$$\begin{aligned} A_{1,5} &= 0,5 \times (1,9394)^{1,5} = 1,3504 \text{ mm} \\ B_{1,5} &= 0,25 \times 1,3504 = 0,3376 \text{ mm} \\ n_{1,5} &= 25,4 / (1,3504 + 0,3376) = 15 \end{aligned}$$

Las demás posiciones complementarias crecientes de la serie, fueron determinadas de manera similar.

Serie complementaria decreciente:

Si $p = -1$, $f = -0,5$:

$$\begin{aligned} A_{-0,5} &= 0,5 \times (1,9394)^{-0,5} = 0,3590 \text{ mm} \\ B_{-0,5} &= 0,25 \times 0,3590 = 0,0898 \text{ mm} \\ n_{-0,5} &= 25,4 / (0,3590 + 0,0898) = 56,6 \approx 56 \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Si $p = -2$, $f = -1,5$:

$$\begin{aligned} A_{-1,5} &= 0,5 \times (1,9394)^{-1,5} = 0,1851 \text{ mm} \\ B_{-1,5} &= 0,25 \times 0,1851 = 0,0463 \text{ mm} \\ n_{-1,5} &= 25,4 / (0,1851 + 0,0463) = 109,8 \approx 110 \end{aligned}$$

Si $p = -3$, $f = -2,5$:

$$\begin{aligned} A_{-2,5} &= 0,5 \times (1,9394)^{-2,5} = 0,0955 \text{ mm} \\ B_{-2,5} &= 0,25 \times 0,0955 = 0,0239 \text{ mm} \\ n_{-2,5} &= 24,4 / (0,0955 + 0,0239) = 212,8 \approx 213 \end{aligned}$$

Si $p = -4$, $f = -3,5$:

$$\begin{aligned} A_{-3,5} &= 0,5 \times (1,9394)^{-3,5} = 0,0492 \text{ mm} \\ B_{-3,5} &= 0,25 \times 0,0492 = 0,0123 \text{ mm} \\ n_{-3,5} &= 25,4 / (0,0492 + 0,0123) = 413 \end{aligned}$$

Los valores calculados, aparecen en la tabla que se muestra a continuación

SERIE DE PULGADAS Y TAMICES NORMALIZADA CON SU COMPLEMENTARIA

Malla No	LUZ DE LA MALLA			Diámetro del Alambre (mm)
	Pulgadas	(mm)	Micras (mm. 1000)	
1	0.5401	13.7181		3.4295
2	0.3878	9.8508		2.4627
3	0.2785	7.0734		1.7683
4	0.2000	5.0793		1.2698
6	0.1436	3.6472		0.9118
7 1/2	0.1032	2.6190		0.6548
11	0.0740	1.8806		0.4702
15	0.0532	1.3504		0.3376
21	0.0382	0.9697	969.7	0.2424
29	0.0274	0.6963	696.3	0.1741
41	0.0197	0.5000	500.0	0.2500
56 1/2	0.0141	0.3590	359.0	0.0898
79	0.0101	0.2578	257.8	0.0645
110	0.0073	0.1851	185.1	0.0463
153	0.0052	0.1329	132.9	0.0332
213	0.0038	0.0965	95.5	0.0239
296 1/2	0.0027	0.0685	68.5	0.0171
413	0.0019	0.0492	49.2	0.0123
576	0.0014	0.0353	35.3	0.0088

EJERCICIO N° 14

PREGUNTAS

Elaborar una serie de tamices normalizada, utilizando para ello las condiciones siguientes:

- 1) La base de la serie es un tamiz de 150 mallas por pulgada lineal (25.4 mm)
- 2) Utilizar una progresión geométrica, cuya razón sea (Ln 3)
- 3) El diámetro del alambre con que se fabrica el tamiz, es igual al 75% de la luz de la

malla.

SOLUCION

Para este ejercicio, utilizaremos las ecuaciones (8) y (14). Los datos de que se dispone son

$$R = \text{Ln } 3$$

$$B = 0.75A$$

$$n_0 = 150$$

Para el tamiz base, con la ayuda de (8):

$$150A_0 + 150 \times 0.75A_0 = 25.4$$

$$A_0 = 25.4 / (150 \times 1.75) = 0.0968 \text{ mm}$$

$$B_0 = 0.0968 \times 0.75 = 0.0726 \text{ mm}$$

Combinando (8) y (14), determinamos la serie normal ascendente

Si $p = 1$:

$$A_1 = 0.0968 \times (\text{Ln } 3)^1 = 0.1063 \text{ mm}$$

$$B_1 = 0.75 \times 0.1063 = 0.0798 \text{ mm}$$

$$n_1 = 25.4 / (0.1063 + 0.0798) = 136.54 \approx 136 \frac{1}{2}$$

Si $p = 2$

$$A_2 = 0.0968 \times (\text{Ln } 3)^2 = 0.1168 \text{ mm}$$

$$B_2 = 0.75 \times 0.1168 = 0.0876 \text{ mm}$$

$$n_2 = 25.4 / (0.1168 + 0.0876) = 124.27 \approx 124 \frac{1}{3}$$

De este mismo modo se realizan los cálculos para las demás celdas que constituyen la escala ascendente de la serie, y que aparecen en la tabla
Combinando de nuevo (8) y (14), determinamos la serie normal descendente:

Si $p = -1$:

$$A_1 = 0,0968 \times (\ln 3)^1 = 0,0881 \text{ mm}$$

$$B_1 = 0,75 \times 0,0881 = 0,0661 \text{ mm}$$

$$n_1 = 25,4 / (0,0881 + 0,0661) = 164,73 = 164 \text{ y } 8/11$$

Si $p = -2$:

$$A_2 = 0,0968 \times (\ln 3)^2 = 0,0802 \text{ mm}$$

$$B_2 = 0,75 \times 0,0802 = 0,0602 \text{ mm}$$

$$n_2 = 25,4 / (0,0802 + 0,0602) = 180,97 \approx 181$$

De esta misma manera, se procedió al cálculo de todos los demás valores de la serie descendente de tamices, y que aparecen la siguiente tabla:

SERIE DE TAMICES NORMALIZADA CON UNA RAZON = $\ln 3$

Nº de malla	LUZ DE LA MALLA			Diámetro del alambre (mm)
	Pulgadas	(mm)	Micras (mm. 1000)	
40 15	0,0142	0,362	361,2	0,2709
44 16	0,0129	0,3287	328,7	0,2466
48 17	0,0118	0,2992	299,2	0,2244
53 18	0,0107	0,2724	272,4	0,2043
58 19	0,0098	0,2479	247,9	0,1859
64 20	0,0089	0,2257	225,7	0,1693
70 22	0,0081	0,2054	205,4	0,1541
77 24	0,0074	0,1870	187,0	0,1402
85 25	0,0067	0,1702	170,2	0,1276
93 28	0,0061	0,1549	154,9	0,1162
103 30	0,0056	0,1410	141,0	0,1058
113 33	0,0051	0,1284	128,4	0,0963
124 36	0,0046	0,1168	116,8	0,0876
136 40	0,0042	0,1063	106,3	0,0798
150 45	0,0038	0,0968	96,8	0,0726
164 50	0,0035	0,0881	88,1	0,0661
181 55	0,0032	0,0802	80,2	0,0602
198 60	0,0029	0,0730	73,0	0,0548
218 65	0,0026	0,0665	66,5	0,0498
240 70	0,0024	0,0605	60,5	0,0454

CARACTERISTICAS

- 1) Preferiblemente para clasificación de finos
- 2) No necesita serie complementaria.
- 3) Se puede seleccionar la sub-serie que se desee, con solo elevar el valor de "A" a una potencia igual al número de tamices que se busque saltar para establecer una normalidad con una nueva razón por ejemplo, si se desea seleccionar una sub-serie cada 3 tamices tomando una base cualquiera (por ejemplo el # 240), establezco una nueva razón $(\ln 3)^3$, así, el tamiz siguiente sería $0,0605 \times (\ln 3)^3 = 0,0802 \text{ mm}$ de luz que equivale al # 181 de la serie, y el siguiente sería $0,0802 \times (\ln 3)^3 = 0,1063 \text{ mm}$ de luz (malla # 136 1/2), y así sucesivamente.
- 4) Aplicando las expresiones (8) y (14), esta serie se puede proyectar indefinidamente de manera creciente o decreciente, lo cual le proporciona una gran versatilidad, pues la vuelve aplicable para granulometría gruesa o fina (V.g. n.º 14 1/2 B = 8,0013 mm y A = 10,6684 mm para una malla gruesa).
- 5) Con la aplicación de esta tabla, se pueden realizar análisis granulométricos con gran precisión, en virtud de que la diferencia en la luz de mallas consecutivas, es muy pequeña (menor que en la series convencionales).

CAPITULO II
CONCENTRACION

EJERCICIO N° 1

Granos esféricos de calcopirita (4,2) y grafito (2,2) tienen diámetros de 1 y 14 mm (los números entre paréntesis representan las densidades). Utilizando la ecuación de Ritter Von Rittinger, para la velocidad de caída límite de granos en el agua.

PREGUNTAS

- 1 Las velocidades de caída límite para cada uno de estos minerales
- 2 ¿Cuales serán los tamaños de los granos de calcopirita, isódromos con los de grafito para los diámetros dados?
- 3 ¿Cuales serán los tamaños de los granos de grafito, isódromos con los de calcopirita para los diámetros dados?
- 4 ¿Cual será la velocidad de caída límite de los granos de calcopirita determinados en (2)?
- 5 ¿Cual será la velocidad de caída límite de los granos de grafito determinados en (3)?

SOLUCION

1.

Ecuación de Ritter Von Rittinger:

$$V = K \sqrt{\frac{D - \rho}{\rho}} L \quad (1)$$

donde

- K = constante = 5,11 para granos esféricos
- V = velocidad de caída límite
- D = densidad del mineral
- ρ = densidad del fluido = 1 cuando se trata del agua.
- L = tamaño del grano

Cuando se trata del agua (1) y los granos son esféricos, (1) se convierte en

$$V = 5,11 \sqrt{L(D-1)} \quad (2)$$

Para el grafito, con diámetros de 1 y 14 mm:

$$V_1 = 5,11 \times [(1 \times (2,2-1))]^{1/2} = 5,5977 \approx 5,6 \text{ mm/seg. (1-1)}$$

$$V_2 = 5,11 \times [(14 \times (2,2-1))]^{1/2} = 20,94 \text{ mm/seg. (1-1)}$$

Para la calcopirita con diámetros de 1 y 14 mm:

$$V_1 = 5,11 \times [(1 \times (4,2-1))]^{1/2} = 9,141 \text{ mm/seg (1-1)}$$

$$V_2 = 5,11 \times [(14 \times (4,2-1))]^{1/2} = 34,20 \text{ mm/seg. (1-1)}$$

2.

Si:

- d = densidad del grafito
- L = tamaño del grano del grafito
- D = densidad de la calcopirita
- l = tamaño del grano de la calcopirita
- V_M = velocidad de caída límite para granos esféricos en agua en reposo

$$V_{C(g)} = 5,11 \{(L(d-1))\}^{1/2}$$

$$V_{cal} = 5,11 \{(l(D-1))\}^{1/2}$$

Serán isódromos si

$$V_{C(g)} = V_{cal}, \text{ es decir}$$

$$5,11 \times \{(L(d-1))\}^{1/2} = 5,11 \times \{(l(D-1))\}^{1/2}$$

tamaño de grano de calcopirita, isódromo al de grafito:

$$l = L(d-1)/(D-1) \quad (3)$$

Cuando el grano de grafito, tiene un diámetro = 1,0 mm:

$$l = 1 \times (2,2-1)/(4,2-1) = 0,375 \text{ mm (1-2)}$$

Cuando el grano de grafito, tiene un diámetro de 14,0 mm:

$$l = 14(2,2-1)/(4,2-1) = 5,25 \text{ mm (1-2)}$$

Para determinar los granos de grafito, isódromos con los de calcopirita, volvemos a utilizar (3):

$$L = l(D-1)/d-1:$$

Cuando el grano de calcopirita, tiene un diámetro de 1,0 mm.

$$L = 1 \times (4,2-1)/(2,2-1) = 2,67 \text{ mm (1-3)}$$

Cuando grano de calcopirita, tiene un diámetro de 14,0 mm.

$$L = 14 \times (4,2-1)/(2,2-1) = 37,34 \text{ mm (1-3)}$$

4.

La velocidad de caída límite de los granos de calcopirita, isódromos con los de grafito,

será

$$V_1 = 5,11 \times [(0,375(4,2-1))]^{1/2} = 5,6 \text{ mm/seg (1-4)}$$

$$V_2 = 5,11 \times [(5,25(4,2-1))]^{1/2} = 20,94 \text{ mm/seg (1-4)}$$

5

La velocidad de caída límite de los granos de grafito, isódromos con los de calcopirita,

será

$$V_1 = 5,11 \times [(2,67(2,2-1))]^{1/2} = 9,15 \text{ mm/seg (1-5)}$$

$$V_2 = 5,11 \times [(37,34(2,2-1))]^{1/2} = 34,20 \text{ mm/seg (1-5)}$$

Como se puede observar, un grano de grafito que tenga 1,0 mm de diámetro, caerá en el agua en reposo con la misma velocidad que uno de calcopirita con un diámetro de 0,375 mm (igual ocurre para un grano de grafito de 14,0 mm y otro de calcopirita con 5,25 mm de diámetro. Todo esto es debido al factor densidad.

EJERCICIO N° 2

Al reducir de tamaño una muestra de un mineral de calcopirita, se producen en igual proporción granos esféricos puros de calcopirita (4,2) y grafito (2,2), así como mixtos de calcopirita y grafito, en los cuales se determino por análisis que 1/4 de su peso era grafito.

Los diámetros de los granos producidos, fueron en promedio 1 y 14 mm.

Los números entre paréntesis representan las densidades.

PREGUNTAS

1. Calcular la densidad de los granos de mixtos.
2. Calcular la velocidad de caída límite para cada una de las especies (calcopirita, grafito y mixtos), con los tamaños de grano mencionados.
3. Cuales serán los tamaños de grano de calcopirita, isódromos con los de mixtos?
4. Cuales serán los tamaños de grano de grafito, isódromos con los de mixto?
5. Cuales serán los tamaños de grano del mixto, isódromos con los de calcopirita?
6. Cuales serán los tamaños de grano del mixto, isódromos con los de grafito?
7. Cuales serán las velocidades de caída límite de los granos del mixto, determinados en (5)?
8. Cual será la velocidad de caída límite de los granos del mixto, determinados en (5)?

SOLUCION

1.

Supongamos 1,0 gramos de mixto:

$$\text{Peso de calcopirita en el mixto} = 1,0 \times 3/4 = 0,75 \text{ g}$$

$$\text{Peso del grafito en el mixto} = 1,0 \times 1/4 = 0,25 \text{ g}$$

Para determinar el volumen de 1,0 g de mixto, utilizamos la expresión

$$D = \frac{W}{v} \quad (4)$$

Donde:

D = densidad, W = peso, v = volumen

$$v_{\text{calc}} = 0,75/4,2 = 0,1786 \text{ cm}^3$$

$$v_{\text{C(g)}} = 0,25/2,2 = 0,1136 \text{ cm}^3$$

$$v \text{ (1 gramo de mixto)} = 0,2922 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad del mixto} = 1/0,2922 = 3,422 \text{ g/cm}^3 \text{ (2-1)}$$

2.

Para este cálculo, aplicamos la ecuación (2):

Los valores para la calcopirita y el grafito, ya fueron calculados en el ejercicio # 1 como (9,141 y 34,20 mm/seg) y (5,6 y 20,94 mm/seg), respectivamente.

Para el mixto serían:

$$V_1 = 5,11x[(1,0(3,422-1))]^{1/2} = 7,95 \text{ mm/seg. (2-2)}$$

$$V_2 = 5,11x[(14(3,422-1))]^{1/2} = 29,76 \text{ mm/seg. (2-2)}$$

3.

Sea

d^1 = densidad del mixto = 3,422 g/cm³

L^1 = diámetro de grano del mixto = 1 y 14 mm

Para encontrar los granos de calcopirita isódromos con los de mixto, la ecuación (3) toma la forma: $l = L^1(d^1-1)/(D-1)$, así:

$$l_1 = 1,0x(3,422-1)/(4,2-1) = 0,757 \text{ mm (2-3)}$$

$$l_2 = 14x(3,422-1)/(4,2-1) = 10,6 \text{ mm (2-3)}$$

4.

Para encontrar los granos de grafito isodromos con los de mixto, la ecuación (3) toma la forma $L = L^1(d-1)/(d^1-1)$, así:

$$L_1 = 1,0x(3,422-1)/(2,2-1) = 2,02 \text{ mm (2-4)}$$

$$L_2 = 14x(3,422-1)/(2,2-1) = 28,26 \text{ mm (2-4)}$$

5.

Para encontrar los granos de mixto isodromos con los de calcopirita, la ecuación (3) toma la forma: $L^1 = l(D-1)/(d^1-1)$, así:

$$L^1_1 = 1,0x(4,2-1)/(3,422-1) = 1,32 \text{ mm (2-5)}$$

$$L^1_2 = 14x(4,2-1)/(3,422-1) = 18,50 \text{ mm (2-5)}$$

6.

Para encontrar los granos de mixto isodromos con los de grafito, la ecuación (3) toma la forma: $L^1 = L(d-1)/(d^1-1)$, así:

$$L^1_1 = 1,0x(2,2-1)/(3,422-1) = 0,50 \text{ mm (2-6)}$$

$$L^1_2 = 14x(2,2-1)/(3,422-1) = 6,94 \text{ mm (2-6)}$$

7.

Para determinar las velocidades de caída límite de los granos de mixto calculados en (5), utilizamos la expresión (2), así:

$$V_1 = 5,11x[(1,32(3,422-1))]^{1/2} = 9,14 \text{ mm/seg. (2-7)}$$

$$V_2 = 5,11x[(18,50(3,422-1))]^{1/2} = 34,20 \text{ mm/seg. (2-7)}$$

8.

Para determinar las velocidades de caída límite de los granos de mixto calculados en (6), utilizamos la expresión (2), así:

$$V_1 = 5,11x[(0,50(3,422-1))]^{1/2} = 5,62 \text{ mm/seg. (2-8)}$$

$$V_2 = 5,11x[(6,94(3,422-1))]^{1/2} = 20,95 \text{ mm/seg. (2-8)}$$

EJERCICIO N° 3

PREGUNTAS

1 Utilizando la ecuación de Rittinger determinar la velocidad de caída límite (en agua en reposo) para granos redondeados, alargados y laminares, en una muestra que contiene calcopirita (4,2), grafito (2,2) y mixtos de estos (3,422), siendo en todos los casos, las dimensiones medias de los granos 1,0 y 14,0 mm

2 Calcular la velocidad de caída límite, en el supuesto de que 50% de los granos son redondos, 25% son alargados y 25% son laminares.

SOLUCION

1.

La ecuación (2), de Rittinger es $V = K [L(d-1)]^{1/2}$. En esta expresión, la constante "K" depende de la forma, y es lo que se trata de ejercitar aquí:

Para granos redondeados.

Calcopirita

	$V_1 = 3,2\{(1x(4,2-1))\}^{1/2} = 5,72 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 3,2\{(14(4,2-1))\}^{1/2} = 21,42 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Grafito	$V_1 = 3,2\{(1x(2,2-1))\}^{1/2} = 3,52 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 3,2\{(14(2,2-1))\}^{1/2} = 13,58 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Mixtos	$V_1 = 3,2\{(1x(3,422-1))\}^{1/2} = 4,98 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 3,2\{(14(3,422-1))\}^{1/2} = 18,63 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Para granos alargados Calcopirita	$V_1 = 2,65\{(1x(4,2-1))\}^{1/2} = 4,74 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 2,65\{(14(4,2-1))\}^{1/2} = 17,74 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Grafito	$V_1 = 2,65\{(1x(2,2-1))\}^{1/2} = 2,91 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 2,65\{(14(2,2-1))\}^{1/2} = 11,25 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Mixtos	$V_1 = 2,65\{(1x(3,422-1))\}^{1/2} = 4,12 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 2,65\{(14(3,422-1))\}^{1/2} = 15,43 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Para granos laminares Calcopirita	$V_1 = 2,25\{(1x(4,2-1))\}^{1/2} = 4,02 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 2,25\{(14(4,2-1))\}^{1/2} = 15,06 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Grafito:	$V_1 = 2,25\{(1x(2,2-1))\}^{1/2} = 2,46 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 2,25\{(14(2,2-1))\}^{1/2} = 9,22 \text{ mm/seg. (3-1)}$
Mixtos	$V_1 = 2,25\{(1x(3,422-1))\}^{1/2} = 3,50 \text{ mm/seg. (3-1)}$ $V_2 = 2,25\{(14(3,422-1))\}^{1/2} = 13,10 \text{ mm/seg. (3-1)}$
2	
Para este caso:	$K = 3,2x0,5 + 2,65x0,25 + 2,25x0,25 = 2,825; \text{ Así:}$
Para calcopirita:	$V_1 = 2,825\{(1x(4,2-1))\}^{1/2} = 5,05 \text{ mm/seg. (3-2)}$ $V_2 = 2,825\{(14(4,2-1))\}^{1/2} = 18,91 \text{ mm/seg. (3-2)}$
Para grafito:	$V_1 = 2,825\{(1x(2,2-1))\}^{1/2} = 3,09 \text{ mm/seg. (3-2)}$ $V_2 = 2,825\{(14(2,2-1))\}^{1/2} = 11,58 \text{ mm/seg. (3-2)}$
Para los mixtos	$V_1 = 2,825\{(1x(3,422-1))\}^{1/2} = 4,40 \text{ mm/seg. (3-2)}$ $V_2 = 2,825\{(14(3,422-1))\}^{1/2} = 16,45 \text{ mm/seg. (3-2)}$

EJERCICIO N° 4

Suponer una muestra que contiene granos redondeados, alargados y laminares, de calcopirita (4,2), de grafito (2,2) y de mixtos (3,522), y que los diámetro de los orificios de las cribas que se utilizan para calibrarlos son 1,0 y 14 mm

PREGUNTAS

- 1 La velocidad de caída límite de estos granos en agua en reposo, utilizando la ecuación (2), de Rittinger.
- 2 Suponiendo que en la muestra, 50% de los granos son redondos, 25% alargados y 25% laminares; calcular la velocidad límite.

SOLUCION

La solución a las solicitudes de este ejercicio con la asistencia de la ecuación (2), se logra utilizando el mismo mecanismo desarrollado en el ejercicio # 3

La única diferencia radica en las consideraciones realizadas a Los valores de la constante "K", y que se muestran en el cuadro siguiente:

CONSIDERACIONES A LA CONSTANTE "K" (1)

FORMA DEL GRANO	VALORES DE "K"	
	1ª	2ª
Redondeados	3,20	2,73
Alargados	2,65	2,37
Laminares	2,25	1,92

La columna 1ª de la tabla anterior, se utiliza cuando se toma como diámetro la dimension media de los granos (caso Ejercicio # 3), y la 2ª cuando se hace referencia al diámetro de los orificios de la criba o tamiz que sirven para calibrarlos. Con estas consideraciones, se obtuvieron los resultados siguientes:

1.

Granos redondeados (utilizando de 2ª columna):

Calcopirita:

$$V_1 = 4,88 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 18,27 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Grafito:

$$V_1 = 2,99 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 11,19 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Mixtos:

$$V_1 = 4,25 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 15,90 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Granos alargados

Calcopirita.

$$V_1 = 4,24 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 15,86 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Grafito

$$V_1 = 2,60 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 9,71 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Mixtos:

$$V_1 = 3,69 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 13,80 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Granos laminares.

Calcopirita.

$$V_1 = 3,43 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 12,85 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Grafito.

$$V_1 = 2,10 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 7,87 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

Mixtos

$$V_1 = 2,99 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

$$V_2 = 11,18 \text{ mm/seg. (4-1)}$$

2.

Para este caso, hay que calcular "K", en función de la distribución porcentual de los granos

$$K = 2,73 \times 0,5 + 2,37 \times 0,25 + 1,92 \times 0,25 = 2,44$$

(este valor de K es el más utilizado).

Las velocidades límites determinadas con esta constante, resultan ser

Calcopirita.

$$V_1 = 4,36 \text{ mm/seg. (4-2)}$$

$$V_2 = 16,33 \text{ mm/seg. (4-2)}$$

Grafito.

$$V_1 = 2,67 \text{ mm/seg. (4-2)}$$

$$V_2 = 10,00 \text{ mm/seg. (4-2)}$$

Mixtos.

$$V_1 = 3,80 \text{ mm/seg. (4-2)}$$

$$V_2 = 14,21 \text{ mm/seg. (4-2)}$$

EJERCICIO N° 5

En operaciones de concentración por gravedad, la fórmula de Rittinger solo es aplicable hasta un determinado tamaño mínimo, porque no toma en cuenta la viscosidad (1). Para continuar con el modelo de Rittinger, pero tomando en cuenta la viscosidad, aparece la expresión de Stokes para tamaños pequeños.

$$\text{Ley de Stokes: } 474 L^2 (D-1)^{1/2} \quad (5)$$

Según A, en esta ley de a de ser aplicable a partículas cuyo diámetro sea mayor que el determinado en mm. Por la expresión.

$$L = \frac{0,1692}{\sqrt[3]{D-1}} \quad (6)$$

PREGUNTAS

1. Calcular los tamaños máximos a los que se aplica la Ley de Stokes, para las siguientes especies

- Calcopirita (4,2)
- Grafito (2,2)
- Mixtos de estos (3,422)
- Cinabrio = HgS (8,1)
- Cuarzo (2,65)
- Sal de Epsom = $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (1,7)
- Oro (19,3)

Los números entre paréntesis, representan las densidades.

SOLUCION

1

Aplicando (6) a cada una de las especies mencionadas, tendremos:

Calcopirita.

$$L = 0,1692 / (4,2-1)^{1/3} = 0,115 \text{ mm (1-1)}$$

Grafito:

$$L = 0,1692 / (2,2-1)^{1/3} = 0,159 \text{ mm (1-1)}$$

Mixtos de estos.

$$L = 0,1692 / (3,422-1)^{1/3} = 0,162 \text{ mm (1-1)}$$

Cinabrio

$$L = 0,1692 / (8,1-1)^{1/3} = 0,088 \text{ mm (1-1)}$$

Cuarzo.

$$L = 0,1692 / (2,65-1)^{1/3} = 0,143 \text{ mm (1-1)}$$

Sal de Epsom:

$$L = 0,1692 / (1,7-1)^{1/3} = 0,191 \text{ mm (1-1)}$$

Oro

$$L = 0,1692 / (19,3-1)^{1/3} = 0,064 \text{ mm (1-1)}$$

Como se puede observar, a medida que aumenta la densidad, el tamaño máximo permisible de aplicabilidad de la Ley de Stokes se hace cada vez mas pequeño

EJERCICIO N° 6

Como resultado de la molienda de un mineral de cobre, se obtuvieron partículas con un tamaño promedio de 0,09 mm.

El mineral contenía calcopirita (4,2) y grafito (2,2), y se desea concentrar por gravedad utilizando como fluido el agua en reposo.

PREGUNTAS

Se puede o no utilizar la Ley de Stokes, para controlar el comportamiento en esta operación de concentración?

2. Calcular las velocidades límites de caída para cada especie.

3. Bajo estas condiciones, cuales serán los respectivos isodromos de cada una de las especies?

SOLUCION

1.

El criterio para la aplicación de la Ley de Stokes lo establece la ecuación (6)

Para calcopirita:

$$L = 0,1692/(4,2-1)^{1/3} = 0,115 \text{ mm}$$

Para el grafito:

$$L = 0,1692/(2,2-1)^{1/3} = 0,159 \text{ mm}$$

Si se puede aplicar la Ley de Stokes, dado que:

$$0,09 < 0,115 < 0,119 \text{ (6-1)}$$

2.

Aplicando la Ley de Stokes: $V = 474 L^2 (D-1)$, es decir (5).

Para calcopirita:

$$V = 474 \times (0,09)^2 \times (4,2-1) = 12,29 \text{ mm/seg. (6-2)}$$

Para el grafito

$$V = 474 \times (0,09)^2 \times (2,2-1) = 4,61 \text{ mm/seg. (6-2)}$$

Las partículas de calcopirita, caen $(12,29/4,61) = 2,67$ veces más rápido que las de grafito en agua en reposo.

3.

Cuando se aplica la Ley de Stokes, los tamaños isodromos se determinan de la siguiente manera

Sea

- L = dimensión de la especie más liviana (grafito)
- l = dimensión de la especie más densa (calcopirita)
- D = densidad de la especie más densa (calcopirita)
- d = densidad de la especie más liviana (grafito)

Para tamaños isodromos, se cumple que :

$$\frac{L}{l} = \sqrt{\frac{d}{D} - 1} \quad (7)$$

El tamaño del grano de calcopirita, isódromo con el de grafito, será:

$$l = 0,09 \cdot (2,2-1) + (4,2-1) = 0,055$$

$$l = 0,055 \text{ mm (6-3)}$$

El tamaño del grano de grafito, isódromo con el de calcopirita, será:

$$L = 0,09 \cdot (4,2-1) + (2,2-1) = 0,147$$

$$L = 0,147 \text{ mm (6-3)}$$

EJERCICIO N° 7

Se tiene una muestra formada por galena (7,5) y cuarzo (2,65), en tamaños que oscilan entre 5 y 35 mm de diámetro. La mezcla posee mixtos de estos minerales en condiciones iguales de tamaños.

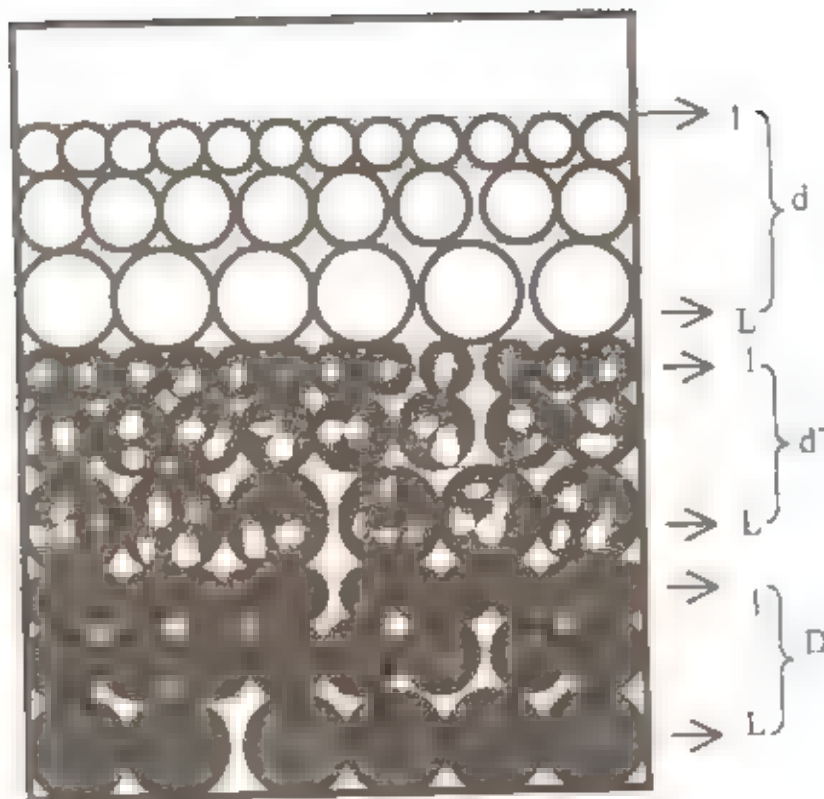
Los $\frac{1}{4}$ del peso de los mixtos, son galena.

Se quiere realizar una concentración por gravedad (fluido agua en reposo), de tal manera que se separen por completo los mixtos de las especies puras (ver Fig. 1), para volverlos a reducir de tamaño; hasta lograr una completa liberación.

PREGUNTAS

1. Realizar los cálculos necesarios tendientes a lograr una separación completa de las especies diferentes de la muestra, por medio de una concentración por gravedad.

SOLUCION



Mineral denso (galena)



Mixtos
Figura N° 1:



Mineral liviano (cuarzo)

l = tamaño menor, L = tamaño mayor
 d = densidad del liviano (cuarzo)
 d' = densidad del mixto
 D = densidad del denso (galena)

Lo que se quiere decir con esta gráfica es que el grano más liviano de galena (en agua), debe caer a mayor velocidad que el más pesado de los mixtos; y que el más liviano de estos, quede por debajo del más pesado de cuarzo, por ser este el mineral menos denso de la muestra.

Esto se logra, si al aplicar la Ley de Rittinger para la velocidad de caída máxima en agua, se llega a cumplir que:

$$V_1 = K\sqrt{l(D-1)} > V_2 = K\sqrt{L'(d'-1)} \quad (8-1)$$

$$V_3 = K\sqrt{l'(d'-1)} > V_4 = K\sqrt{L(d-1)} \quad (8-2)$$

V_1 = velocidad de caída del mineral más denso, de menor tamaño

V_2 = velocidad de caída del mixto, de mayor tamaño

V_3 = velocidad de caída del mixto, de menor tamaño

V_4 = velocidad de caída del mineral más liviano, de mayor tamaño.

1 a: Determinación de la densidad del mixto:

Haremos uso de la ecuación (4).

Sea 1,0 gramo de mixto:

Peso de galena en mixto = $\frac{3}{4} \times 0,75$ g

Peso de cuarzo en mixto = $\frac{1}{4} \times 0,15$ g

Volumen de galena en mixto = $0,75/7,5 = 0,1000 \text{ cm}^3$

Volumen de cuarzo en mixto = $0,25/2,65 = 0,0943 \text{ cm}^3$

Volumen de 1 g de mixto = $0,1943 \text{ cm}^3$

Densidad del mixto = $1/0,1943 = 5,15 \text{ g/cm}^3$ (1.a)

1 b: Determinación del # de cribas o tamices:

Las desigualdades (8-1) y (8-2) se cumplen si $V_1 > V_4$

Por tanto, volvemos a llegar a la expresión (3'), según la cual

$$l/L > (d-1)/(D-1) = r \quad (3')$$

r = relación de densidades en el agua, entre el cuarzo y la galena, lo cual nos proporciona la razón de una progresión geométrica decreciente, para determinar el número de tamices necesarios para realizar una clasificación previa a la concentración

Si, n = # de tamices

A = luz de la criba superior (=35 mm)

A_2 = luz de la criba inferior (= 5 mm)

Estas se correlacionan para los efectos perseguidos, mediante la expresión

$$A_1 = A_2 \times (r)^{n-1} \quad (9), \text{ y}$$

$$n = \frac{\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}{\ln r} + 1 \quad (10)$$

De este modo,

$$n = \frac{\ln \frac{35}{5}}{\ln \frac{2,65-1}{7,5-1}} + 1 = 2,42 \approx 3 \text{ tamices (1.b)}$$

1 c: Determinación del diámetro de los orificios de las cribas o tamices

Si L = diámetro de los orificios, se debe cumplir, que

$$L > L_1 > L_2 > \dots > L_{n-1} > L_n \quad (11)$$

Ordenamos de modo que

$$L/L_1 = L_1/L_2 = \dots = L_{n-1}/L_n = r \quad (12)$$

$$r = (2,65-1)/(7,5-1) = 0,254$$

De modo que si

$$L = 35 \text{ mm}$$

$$L_1 = 35 \times 0,254 = 8,885 \text{ mm}$$

$$L_2 = 8,885 \times 0,254 = 2,257 \text{ mm}$$

El tamiz # 3 se puede construir de 4,99 mm, de modo que todas las partículas pasen por el tamiz de 35 mm, y queden retenidas en el de 4,99 mm (1.c)

Con una clasificación realizada en estos tamices, se cumplirán las desigualdades (8-1) y (8-2) y se pueden separar las especies como lo muestra la Fig 1. Sin embargo, es difícil en una sola operación retirar todas las especies y lo que se garantiza es el retiro de la especie de mayor valor (galena). Si volvemos a separar por gravedad ahora el cuarzo y los mixtos, lo harán porque no son isódromos, y para mayor precisión se pueden volver a reclasificar, así

Utilizando (10)

$$n' = \ln(5/35) + \ln((2,65-1)/5,15-1) = 3,11 \approx 4 \text{ tamices.}$$

Los orificios de los tamices varían an con una $r = 0,3976$ de modo que

$L = 35 \text{ mm}$, $L_1 = 35 \times 0,3976 = 13,916 \text{ mm}$, $L_2 = 35 \times (0,3976)^2 = 5,533 \text{ mm}$, $L_3 = 35 \times (0,3976)^3 = 2,200 \text{ mm}$. El 4º tamiz se puede fabricar con orificios de 4,999 mm

EJERCICIO N° 8

Se tienen dos muestras de minerales, una formada por grafito (2,2) y galena (7,5), mientras que la otra está constituida por grafito y calcopirita (4,2)

Estas muestras, por separado se han de someter a una concentración por gravedad, considerando como fluido el agua en reposo; para lo cual ha de realizarse una concentración previa a la concentración.

Si el tamaño inferior de los granos es de 1,5 mm, y el mayor es de 40 mm:

PREGUNTAS

1. Cuantos tamices o cribas son necesarios en cada caso, y que diámetros deben tener estos para que se produzca la separación completa por gravedad?

SOLUCION

1.

Caso galena-grafito:

Sea:

l = tamaño mínimo (1,5 mm)

L = tamaño máximo (40 mm)

D = densidad de la galena (7,5)

d = densidad del grafito (2,2)

La separación se logra si se cumple la desigualdad (8), y se llega a la (3')

$$(l/L) > (d-1)/(D-1)$$

Si:

M = orificio del tamiz superior (mm)

m = orificio del tamiz inferior (mm), debe cumplirse

$$(m/M) > (d-1)/(D-1)$$

Pero: $L < M$ y $l > m$, por tanto:

$$(l/L) > m/M > (d-1)/(D-1)$$

Basta con que: $(m/M) = (d-1)/(D-1)$

De esta manera, seguir cumpliendo (11), y los tamices se pueden arreglar de modo que

$$L_1/L = L_2/L_1 = L_3/L_2 \dots = L_n/L_{n-1} = (d-1)/(D-1) \quad (12')$$

$(d-1)/(D-1)$ = razón de una progresión geométrica decreciente

$(D-1)/(d-1)$ = razón de una progresión geométrica creciente

Así:

$$(2,2-1)/(7,5-1) = 0,1846 \text{ (r = decreciente), por tanto:}$$

$$L = 40 \text{ mm}$$

$$L_1 = 40 \times 0,1846 = 7,384 \text{ mm}$$

$$L_2 = 7,384 \times 0,1846 = 1,363 \text{ mm}$$

$$\# \text{ de tamices} = 3 \text{ (1-1)}$$

Diámetro de los orificios.

$$L = 40 \text{ mm}$$

$$L_1 = 7,384 \text{ mm}$$

$$L_2 = 1,363 \text{ mm (1-1)}$$

Con esta relación de tamices o cribas, se cumple que

$$L_1/L = L_2/L_1 = 0,1846$$

Caso calcopirita-grafito:

$$\text{Razón } r = (2,2-1)/(4,2-1) = 0,375$$

$$L = 40$$

$$L_1 = 40 \times 0,375 = 15 \text{ mm}$$

$$L_2 = 15 \times 0,375 = 5,625 \text{ mm}$$

$$L_3 = 5,625 \times 0,375 = 2,109 \text{ mm}$$

$$L_4 = 2,109 \times 0,375 = 0,791 \text{ mm}$$

$$\# \text{ de cribas o tamices} = 5 \text{ (1-1)}$$

que el tamiz inferior se fabricara con una luz menor que 1,5 mm, por ejemplo 1,49 mm a objeto de que pudiera retener los granos menores.

Caso calcopirita-grafito:

$$r = (4,2-1)/(2,2-1) = 2,667$$

$$L_4 = 1,5 \text{ mm (9-2)}$$

$$L_3 = 1,5 \times 2,667 = 4,0 \text{ mm (9-2)}$$

$$L_2 = 4 \times 2,667 = 10,667 \text{ mm (9-2)}$$

$$L_1 = 10,667 \times 2,667 = 28,4515 \text{ mm (9-2)}$$

$$L = 28,4515 \times 2,667 = 75,88 \text{ mm (9-2)}$$

El tamiz "L" se puede fabricar con una luz un poco mayor de 40 mm

EJERCICIO N° 10

Rittinger determinó experimentalmente (1) que un grano esférico de galena (7,58) de 16 mm de diámetro recorre en 1 segundo 1.650 mm en agua en reposo, antes de alcanzar la velocidad límite.

PREGUNTAS

1. De que tamaño debería ser un grano de pirita (4,51), para realizar el mismo recorrido en el mismo tiempo?
2. Lo mismo para un grano de cuarzo (2,65)
3. Como consecuencia de lo anterior, resultarían isódromos los granos determinados para pirita y cuarzo?

SOLUCION

1.

Para que un grano de pirita realice este mismo recorrido en el mismo tiempo, debe ser isódromo con el de galena. Los tamaños se pueden determinar así:

Sea:

1. diámetro del grano de galena = 16 mm

l. diámetro del grano de pirita"

D = densidad de la galena = 7,58

d = densidad de la pirita = 4,51

El tamaño del grano de pirita, isódromo al de galena, se calcula mediante la ecuación (3):

$$L = l \times (D-1)/(d-1) = 16 \times (7,58-1)/(4,51-1) = 29,994$$

$$L = 29,994 \text{ mm (10-1)}$$

2.

Para el caso del cuarzo, procedemos de la manera anterior, y el resultado será

$$L = 16 \times (7,58-1)/(2,65-1) = 63,81$$

$$L = 63,81 \text{ mm de diámetro para el grano de cuarzo (10-2)}$$

3.

Para determinar si resultan isódromos los granos de pirita y cuarzo encontrados, debemos calcular sus respectivas velocidades de caída, y si estas resultan iguales, entonces serán isódromos.

Para la pirita:

$$V_p = 5,11 \times ((29,994(4,51-1))^{1/2} = 52,431 \text{ mm/seg. (10-3)}$$

Para el cuarzo:

$$V_c = 5,11 \times ((63,81(2,65-1))^{1/2} = 52,433 \text{ mm/seg. (10-3)}$$

Si son isódromos el cuarzo y la pirita (10-3)

EJERCICIO N° 11

PREGUNTAS

1. Calcular el tamaño del grano de calcopirita (4,2) que es isódromo en el agua, con un grano esférico de cuarzo (2,65) de 2,5 mm de diámetro.

2. ¿Es posible separar por gravedad una muestra que contenga estos minerales, con los tamaños de grano calculados para la isodromia, y suponiendo que no encuentran obstáculos en su caída? El agua está en reposo.

SOLUCION

1.

Sea

l = diámetro del grano de calcopirita

L = diámetro del grano de cuarzo = 2,5 mm

d = densidad del cuarzo = 2,65

D = densidad de la calcopirita = 4,2

El grano isódromo de calcopirita, se puede determinar con la ayuda de (3)

$$l = Lx(d-1)/(D-1)$$

$$l = 2,5x(2,65-1)/(4,2-1) = 1,289$$

$$l = 1,289 \text{ mm (11-1)}$$

2.

Para contestar esta pregunta, es preciso determinar el recorrido inicial que cada partícula (independientemente de su tamaño), efectúa al caer en el líquido (agua), antes de alcanzar su velocidad límite. Esto lo haremos mediante la expresión:

$$h = \frac{g}{2} \cdot \frac{D-1}{D} t^2 \quad (13)$$

Donde

h = recorrido inicial de la partícula al caer (mm)

g = aceleración de la gravedad (= 9800 mm/seg.²)D = Densidad del mineral (g/cm³)

t = tiempo (supongamos = 0,05 seg.)

Para la calcopirita:

$$h = \frac{9800}{2} \cdot \frac{4,2-1}{4,2} \cdot (0,05)^2 = 9,334 \text{ mm}$$

Para el cuarzo

$$h = \frac{9800}{2} \cdot \frac{2,65-1}{2,65} \cdot (0,05)^2 = 7,627 \text{ mm}$$

Como se puede observar (13) no contiene el diámetro de la partícula, por tanto, la caída de los granos en el periodo inicial no depende de este pero si de su densidad y el recorrido inicial de la partícula más densa (calcopirita), antes de llegar a la velocidad límite, es mayor que el de la partícula más liviana (cuarzo) en el mismo tiempo.

Lo anterior permite concluir que aunque los granos sean isódromos, las partículas más densas caerán primero al fondo del recipiente, debido a que al alcanzar la velocidad límite, llevan recorrido un espacio mayor (11-2).

EJERCICIO N° 12

PREGUNTAS

1. Partiendo del reposo y utilizando como fluido el agua, ¿en que tiempo habrán recorrido los granos de calcopirita (4,2), el mismo espacio que los granos de garena (7,58) en 0,5 seg.?

SOLUCION

1.

Despejando de la ecuación (13):

$$t = \left(\frac{2hD}{g(D-1)} \right)^{1/2}$$

Para la garena:

$$h = (9800/2) \cdot (7,58-1)/7,58 \cdot (0,5)^2 = 1063,39 \text{ mm}$$

Para la calcopirita

$$t = \left[\frac{2 \times 1063,39 \times 4,2}{9800(4,2 - 1)} \right]^{1/2} = 0,534 \text{ seg. (12-1)}$$

Esto quiere decir, que para realizar el mismo recorrido inicial en agua, la partícula más liviana (calcopirita), utiliza un tiempo mayor (12-1).

EJERCICIO N° 13

PREGUNTAS

1. ¿Cuál será la velocidad límite de un grano de galena (7,58), esférico de 16 mm de diámetro, que parte del reposo utilizando como fluido el agua, justo después de haber realizado el recorrido inicial?

2. ¿Cuáles serán la altura y el tiempo de la caída inicial?

3. Realizar los cálculos (1.) y (2.) para el cuarzo (2,65).

4. ¿Cuanto tiempo tardaría la partícula de cuarzo en realizar el mismo recorrido que la galena?

5. ¿Que altura habrá descendido la partícula de cuarzo en el mismo tiempo que la partícula de galena?

SOLUCION

1.

En este caso, utilizamos la siguiente expresión:

$$G = \frac{D-1}{D} \cdot g - \frac{3}{4} \cdot \frac{Kv^2}{DL} \quad (14)$$

Donde

G = aceleración de la caída de los granos en agua

D = densidad de la partícula = 7,58 g/cm³ = 0,00758 g/mm³

g = aceleración de la gravedad = 9800 mm/seg.²

K = constante, que para el agua = 0,5

V = velocidad en mm/seg.

L = diámetro de la partícula esférica = 16 mm

Cuando se alcanza la velocidad límite, G = 0

$$\frac{D-1}{D} \cdot g - \frac{3}{4} \cdot \frac{Kv^2}{DL} = 0$$

$$v = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{D-1}{D} \cdot g \cdot \frac{DL}{K} \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$v = \left(\frac{4}{3} \times \frac{7,58-1}{7,58} \times 9800 \times \frac{0,00758 \times 16}{0,5} \right)^{1/2} = 52,45 \text{ mm/seg (13-1)}$$

Este mismo valor se puede obtener, utilizando la ecuación de Rittinger:

$$V = 5,11 \times (16 \times (7,58-1))^{1/2} = 52,43 \text{ mm/seg. (13-1)}$$

2.

Utilizando (13):

Sabemos que

$$v = \frac{h}{t} = \frac{g}{2} \cdot \frac{D-1}{D} \cdot t \therefore t = \frac{2vD}{g(D-1)}$$

$$t = (2 \times 52,45 \times 7,58) / (9800 \times 6,58) = 0,0123 \text{ seg. (13-2)}$$

$$h = (9800/2) \times (6,58/7,58) \times (0,0123)^2 \quad (13-2)$$

3.

Los cálculos para el cuarzo son:

Utilizando (15):

$$v = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{2,65-1}{2,65} \times 9800 \times \frac{0,00265 \times 16}{0,5} \right]^{1/2} = 26,27 \text{ mm/seg. (13-3)}$$

Con Rittinger:

$$V = 5,11 \times [(16 \times (2,65-1))]^{1/2} = 26,26 \text{ mm/seg. (13-3)}$$

Utilizando (13):

$$t = (2 \times 26,27 \times 2,65) \div (9800 \times 1,65) = 8,61 \times 10^{-3} \text{ seg. (13-3)}$$

$$h = (9800/2) \times (1,65/2,65) \times (8,61 \times 10^{-3})^2 = 0,226 \text{ mm (13-3)}$$

La diferencia en los resultados, para la galena y para el cuarzo, se debe exclusivamente a la densidad

4

Para este cálculo, despejamos "t" desde (13):

$$t = [(2 \times 0,647 \times 2,65) / (9800 \times 1,65)]^{1/2} = 0,0146 \text{ seg. (13-4)}$$

5.

Utilizamos (13):

$$h = (9800/2) \cdot (1,65/2,65) \cdot (0,0123)^2 = 0,462 \text{ mm (13-5)}$$

EJERCICIO N° 14

PREGUNTAS

Realizar los mismos cálculos del ejercicio anterior (#13), pero para un tamaño de grano de 4 mm

SOLUCION

1.

Para la galena.

Utilizando (15)

$$V = ((4 \times 6,58 \times 9800 \times 0,00758 \times 4) \div (3 \times 7,58 \times 0,5))^{1/2} = 26,27 \text{ mm/seg.}$$

$$V = 26,27 \text{ mm/seg. (14-1)}$$

Utilizando Rittinger.

$$V = 5,11 \cdot ((4 \times (7,58)))^{1/2} = 26,22 \text{ mm/seg.}$$

$$V = 26,22 \text{ mm/seg. (14-1)}$$

2.

$$t = (2 \times 26,27 \times 7,58) \div (9800 \times 6,58) = 6,18 \cdot 10^{-3} \text{ seg.}$$

$$t = 6,18 \cdot 10^{-3} \text{ seg. (14-2)}$$

Utilizando (13):

$$h = (9800/2) \cdot (6,58/7,58) \cdot (6,18 \cdot 10^{-3})^2 = 0,162 \text{ mm}$$

$$h = 0,162 \text{ mm (14-2)}$$

3

Para el cuarzo.

$$V = ((4 \times 1,65 \times 9800 \times 0,00265 \times 4) \div (3 \times 2,65 \times 0,5))^{1/2} = 13,13 \text{ mm/seg.}$$

$$V = 5,11 \cdot (4 \times 1,65)^{1/2} = 13,13 \text{ mm/seg.}$$

$$V = 13,13 \text{ mm/seg. (14-3)}$$

$$t = (2 \times 13,13 \times 2,65) \div (9800 \times 1,65) = 4,3 \times 10^{-3} \text{ seg.}$$

$$t = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ seg. (14-3)}$$

$$h = (9800/2) \cdot (1,65/2,65) \cdot (4,3 \times 10^{-3})^2 = 0,00565 \text{ mm}$$

$$h = 0,00565 \text{ mm (14-3)}$$

4

$$t = ((2 \times 0,162 \times 2,65) \div (9800 \times 1,65))^{1/2} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ seg.}$$

$$t = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ seg. (14-4)}$$

5

$$h = (9800/2) \cdot (1,65/2,65) \cdot (6,18 \times 10^{-3})^2 = 0,1165 \text{ mm}$$

$$h = 0,1165 \text{ mm (14-5)}$$

EJERCICIO N° 15

PREGUNTAS

1. Calcular la velocidad de caída límite (libre), en agua en reposo para un grano esférico de galena de 1,0 mm de diámetro.
2. Igual que en (1.), para un grano de 2,5 mm de diámetro.
3. ¿Qué ocurrirá con los granos de (1.) y (2.), si son sometidos a la acción de una corriente ascensional de 13,108 mm/seg.?
4. ¿Qué ocurrirá con las partículas de (1.) y (2.), si la velocidad de la corriente ascensional fuera de 20,725 mm/seg.?
5. ¿Qué ocurrirá con estas partículas, si la velocidad de la corriente ascensional fuera de 5,0 mm/seg.?

SOLUCION

1.

Sea.

V_1 = velocidad de caída libre de la galena

d = diámetro del grano de galena = 1,0 mm

D = densidad de la galena = 7,58 g/cm³

Utilizando (2):

$$V_1 = 5,11 \cdot (1 \times 6,58)^{1/2} = 13,108 \text{ mm/seg}$$

$$V_1 = 13,108 \text{ mm/seg. (15-1)}$$

2.

Volviendo a aplicar (2) para este caso:

$$V_2 = 5,11 \cdot (2,5 \times 6,58)^{1/2} = 20,725 \text{ mm/seg.}$$

$$V_2 = 20,725 \text{ mm/seg. (15-2)}$$

3.

Sea

V_1 = velocidad de la corriente líquida del agua

V_r = velocidad relativa entre la corriente de agua y la de la partícula

$$V_r = V_1 - V_1 \quad (16)$$

Para el grano de (1.)

$$V_{r1} = 13,108 - 13,108 = 0$$

$$V_{r1} = 0 \uparrow \downarrow \quad (15-3)$$

La partícula de galena de 1,0 mm de diámetro, por tener $V_r = 0$, permanecerá suspendida en el fluido.

Para el grano de (2.):

$$V_{r2} = 13,108 - 20,725 = -7,617 \text{ mm/seg.}$$

$$V_{r2} = 7,617 \text{ mm/seg.} \downarrow \quad (15-3)$$

El hecho de que V_r sea negativa, indica que esta partícula desciende con una velocidad de 7,617 mm/seg.

4

Para el caso (1.):

$$V_{r1} = 20,725 - 13,108 = 7,617 \text{ mm/seg.}$$

$$V_{r1} = 7,617 \text{ mm/seg.} \uparrow \quad (15-4)$$

Para el caso (2.):

$$V_{r2} = 20,725 - 20,725 = 0$$

$$V_{r2} = 0 \uparrow \downarrow \quad (15-4)$$

En el caso (1.) $V_{r1} > 0$, y por tanto, la corriente arrastra la partícula con una velocidad de 7,617 mm/seg. Y no la deja descender (la expulsa del recipiente).

En el caso (2.) $V_{r2} = 0$. La partícula no desciende (permanece suspendida en el fluido).

5.

Caso (1.):

$$V_{r1} = 5 - 13,108 = -8,108 \text{ mm/seg}$$

$$V_{r1} = 8,108 \text{ mm/seg.} \downarrow \quad (15-5)$$

Caso (2.):

$$V_{r2} = 5 - 20,725 = -15,725 \text{ mm/seg.}$$

$$V_{r2} = 15,725 \text{ mm/seg.} \downarrow (15-5)$$

Ambas partículas descienden pero a diferentes velocidades. En este caso, se efectuaría una clasificación por tamaños, y las partículas de (2) por descender a mayor velocidad se asentarían en el fondo del recipiente, es decir, por debajo de las de (1.).

EJERCICIO N° 16 (2)

En una instalación de preconcentración de un mineral de zinc y plomo, se utiliza la separación por medios densos. Se opera con una suspensión de Fe-Si en la que se tiene una densidad de $2,73 \text{ g/cm}^3$ y se obtienen unos productos flotados y hundidos de densidades próximas a $2,66$ y $2,81 \text{ g/cm}^3$ respectivamente.

El diagrama de bloque de la operación es el siguiente:

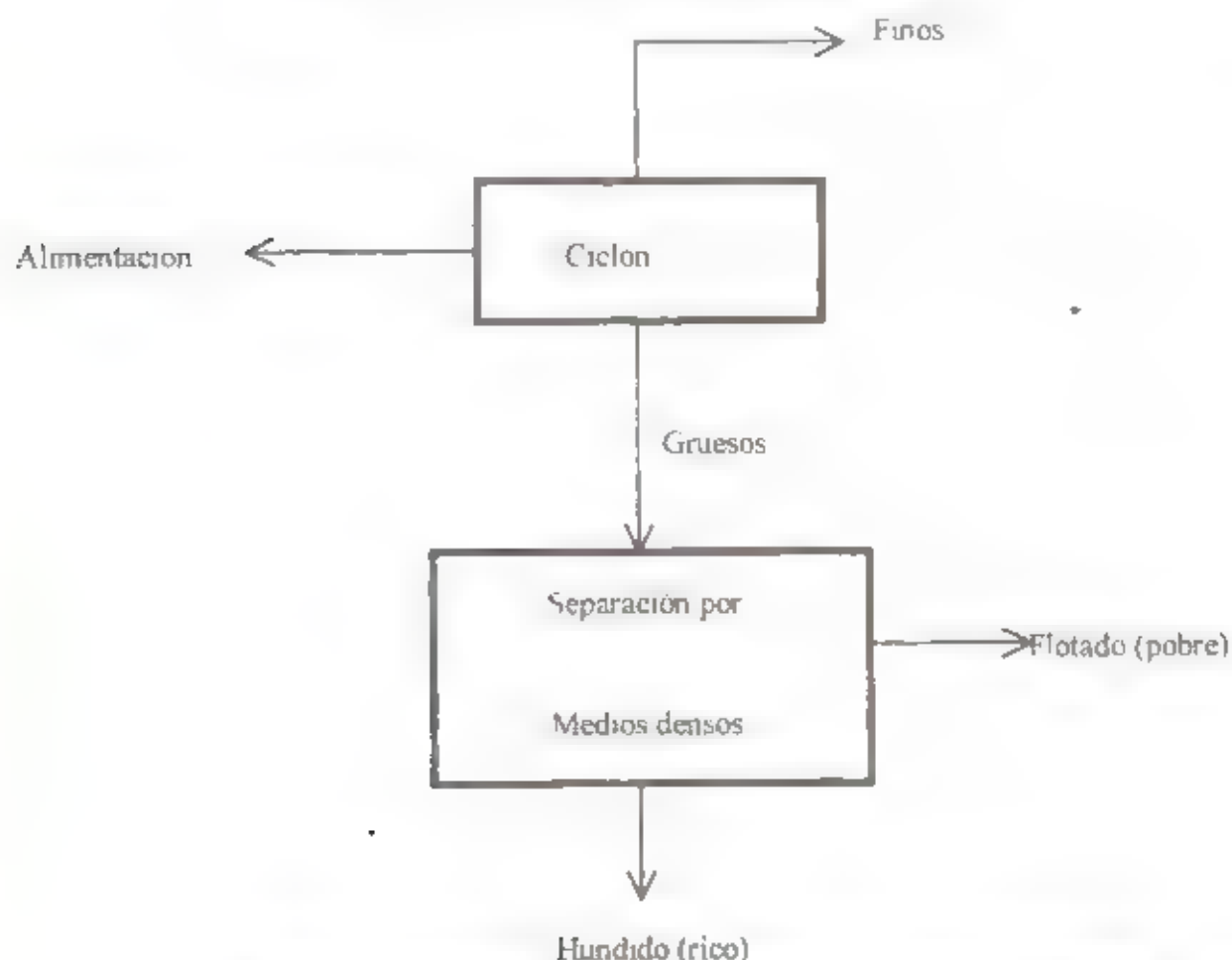


Figura N° 2 Diagrama de bloques (concentración por Medios Densos)

La alimentación se pasa por un ciclón para eliminar finos, y los gruesos se llevan a la separación por medios densos.

Los finos representa un 1% de la alimentación.

La composición media de la alimentación y de los productos, obtenidos en un periodo de funcionamiento de la instalación de un mes es la siguiente:

	Zn(%)	Pb(%)
Alimentación	4,99	0,745
Finos en ciclón	7,00	1,00
Flotado	0,88	0,10
Hundido	8,80	1,27

PREGUNTAS

1. Determinar la composición de la alimentación en la instalación de medios densos
2. Determinar las cantidades de los productos ligeros y densos obtenidos, realizando el balance referido al zinc y al plomo.

SOLUCION

1

Para el ciclón (ver Fig 2)

Sea

A = peso de la alimentación

F = peso de los finos

G = peso de los gruesos

El balance resulta ser:

$$A = F + G \quad (17)$$

Supongamos que: A=100 g, F=1,0 g y G = 99,0 g.

Balance para el Zn (ver el cuadro anterior):

$$0,0499A = 0,07F + X_{Zn}G$$

$X_{Zn}G$ = fracción de Zn en los gruesos

Dando valores:

$$0,0499 \times 100 = 1 \times 0,007 + X_{Zn} \times 99$$

$$X_{Zn} \text{ en gruesos} = (100 \times 0,0499 - 1 \times 0,007) / 99 = 0,0497$$

$$Zn = 4,97\% \text{ en la alimentación del sistema de medios densos (16-1)}$$

Balance para el plomo:

$$0,00745A = 0,01F + X_{Pb}G$$

$X_{Pb}G$ = fracción de Pb en los gruesos

Dando valores:

$$0,00745 \times 100 = 0,01 \times 1 + X_{Pb} \times 99$$

$$X_{Pb} = (100 \times 0,00745 - 1 \times 0,01) / 99 = 0,00742$$

$$Pb = 0,742\% \text{ en la alimentación del sistema de medios densos (16-1)}$$

2.

Las cantidades de productos ligeros (P), y densos (R) para una alimentación a la instalación de medios densos (100), se calcula mediante los balances siguientes:

$$100 = P + R \quad (18)$$

Balance para el Zn:

$$100 \times 0,0497 = 0,0088P + 0,088R$$

De (18): $P = 100 - R$

$$4,97 = 0,0088 \cdot (100 - R) + 0,088R$$

$$R = (4,97 - 0,88) / 0,0792 = 51,6 \quad (16-2)$$

$$P = 100 - 51,6 = 48,4 \quad (16-2)$$

Balance para el Pb:

$$100 \times 0,00742 = 0,001P + 0,00127R$$

$P = 100 - R$

$$R = (0,742 - 0,01) / 0,0117 = 54,9 \quad (16-2)$$

$$P = 100 - 54,9 = 45,1 \quad (16-2)$$

EJERCICIO N° 17 (3)

Una celda experimental de flotación (ver Fig 3) tiene un volumen efectivo de 12 litros

Dicha celda es alimentada con un mineral de plomo que contiene 65%Pb, y una densidad de pulpa con el 15% de sólidos por peso.

Se obtiene un concentrado con 72,5%Pb y una cola con 0,5%Pb.

La gravedad específica del sólido es 3,474.

PREGUNTAS

1. Determinar la relación agua-sólidos en peso.
2. La gravedad específica de la pulpa.
3. El porcentaje de sólidos por volumen
4. El volumen del sólido.
5. El volumen de agua.
6. El peso del sólido en la alimentación.
7. La razón de concentración
8. El peso del concentrado

9. El peso de las colas.
10. La recuperación.

SOLUCION

1

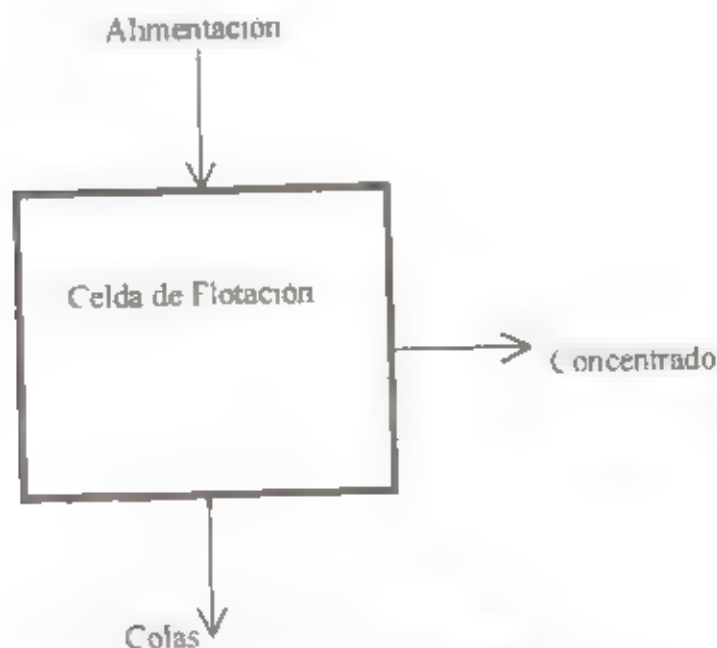


Figura N° 3: Balance de una Celda de Flotación.

En la solución de estos ejercicios, vamos a utilizar los símbolos que se utilizan en la bibliografía que trata el tema de la flotación, independientemente de que se puedan haber utilizado para otras consideraciones.

Sea:

A = % sólidos por peso (=15)

B = relación agua/ sólidos por peso.

$$B = \frac{100 - A}{A} \quad (19)$$

$$B = (100 - 15) / 15 = 5.67$$

$$B = 5.67:1 \quad (17-1)$$

2

Sea:

G = gravedad específica del sólido (=3,474)

S = gravedad específica de la pulpa

$$S = \frac{1 + B}{B + \frac{1}{G}} \quad (20)$$

$$S = \frac{1 + 5.67}{5.67 + \frac{1}{3.474}} = 1.119 \quad (17-2)$$

$$S = 1.1195 \quad (17-2)$$

3

Sea:

V = % sólidos por volumen

$$V = A \left(\frac{S}{G} \right) \quad (21)$$

$$V = 15 \cdot (1.1195 / 3.474) = 4.834$$

$$V = 4.834 \quad (17-3)$$

4

$$\text{Volumen del sólido} = 12 \times 0,04824 = 0,58056 \text{ lts} = 580,56 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen del sólido} = 0,58056 \text{ lts} = 580,56 \text{ cm}^3 (17-4)$$

$$\text{Volumen de agua} = 12 - 0,58056 = 11,419 \text{ lts}$$

$$\text{Volumen de agua} = 11,419 \text{ lts} (17-5)$$

6

Aplicando la ecuación (4):

$$\text{Peso del sólido} = 580,56 \times 3,474 = 2016,86 \text{ g.}$$

$$\text{Peso del sólido alimentado} = 2016,86 \text{ g.} (17-6)$$

7

Sea

K = razón de concentración

c = % del elemento de interés en el concentrado

f = % del elemento de interés en la alimentación

t = % del elemento de interés en las colas

$$K = \frac{c - t}{f - t} \quad (22)$$

$$K = (72,5 - 0,5) / (6,5 - 0,5) = 12$$

$$K = 12 (17-7)$$

8

Sea

F = peso de la alimentación

C = peso del concentrado

$$K = \frac{F}{C} \quad (23)$$

$$C = 2016,86 / 12 = 168,07 \text{ g.}$$

$$C = 168,07 \text{ g.} (17-8)$$

9.

Sea:

T = peso de las colas

$$F = C + T$$

$$T = F - C = 2016,86 - 168,07 = 1848,79 \text{ g}$$

$$T = 1848,79 \text{ g} (17-9)$$

10.

Sea

R = recuperación (%)

$$R = \frac{c(f - t)}{f(c - t)} \times 100 \quad (25)$$

$$R = 72,5 \cdot (6,5 - 0,5) \div 6,5 \cdot (72,5 - 0,5) = 92,95\%$$

$$R = 92,95\% (17-10)$$

EJERCICIO N° 18

En pruebas preliminares en un laboratorio de flotación que utilizo para laboratorio, maquina Denver # D-2 o D-12 (4), se determinaron los siguientes resultados para un mineral de cobre, con miras a optimizar la recuperación:

Gravedad específica del mineral seco = 2,7

% sólidos en la alimentación (laboratorio) = 30

Tiempo de retención en laboratorio = 6,5 min.

Asumir que en planta se procesarán 14500 toneladas cortas de mineral seco por día

Para la producción en la planta, se especifican celdas de 500 ó 600 pies cúbicos (ft³), (utilizar las de 500 ft³)

Utilizar durante la flotación 15% en volumen de aire.

PREGUNTAS

1. Determinar el factor de escala, para el tiempo de retención entre el laboratorio y la planta.
2. Determinar el tiempo de retención en planta.
3. ¿Cuál será el flujo de pulpa a la sección de flotación?
4. ¿Cuál será el flujo de pulpa aireada?
5. Calcular el requerimiento de pulpa por celda.
6. Calcular el número total de celdas.
7. Calcular el número de baterías ó pilas de celdas.

SOLUCION

1.

Utilizando datos experimentales tabulados (4), se puede calcular el factor de escala para el tiempo de retención, entre la flotación en laboratorio y la flotación en planta, así

Para el cobre:

Tiempo de retención usual en flotación:

En la industria = 13 a 16 min.

En laboratorio = 6 a 8 min.

Tiempo promedio de flotación:

En la industria = $(13+16)/2 = 14,5$ min.

En laboratorio = $(6+8)/2 = 7$ min.

Factor de escala = $14,5/7 = 2,07$

Factor de escala = 2,07 (18-1)

2

Tiempo de retención en la planta = $6,5 \times 2,07 = 13,455$ min.

Tiempo retención en planta = 13,46 min. (18-2)

3.

Para calcular el flujo de pulpa en la sección de flotación utilizamos datos experimentales (5)

Para

Gravedad específica del sólido = 2,7

% sólidos por peso = 30

Encontramos el siguiente flujo de pulpa (5):

$(\text{ft}^3 \text{ de pulpa/min/ton. de sólidos secos/hr}) = 1,45$

Así:

$(14500 \text{ ton. sólidos/día}) (\text{día}/24\text{hr}) (1,45 \text{ ft}^3 \text{ pulpa/min}) (\text{hr/ton Sólidos}) = 876,04$

Flujo de pulpa en sección de flotación = 876 ft³/min. (18-3)

4.

Dado que el aire utilizado es 15% del volumen de la pulpa:

Flujo de pulpa aireada = $876/0,85 = 1030,64$

Flujo de pulpa aireada = 1031 ft³/min. (18-4)

5

Pulpa total requerida = $1030,64 \times 13,46 = 13872,41$

Pulpa total requerida = 13872,41 ft³ (18-5)

6.

total de celdas = $(13872,41 \text{ ft}^3) + (500 \text{ ft}^3/\text{celda}) = 27,74$

total de celdas = 28 (18-6)

7

Utilizando datos tabulados (5), se consigue el # de celdas de flotación Denver que debe tener cada pila o batería para flotación preliminar o de desbaste de mineral de cobre, siendo este entre 12 y 20 celdas por pila, y como óptimo, entre 14 y 17. Si tomamos 14:

pilas = $(28 \text{ celdas}) + (14 \text{ celdas/pila}) = 2$

de pilas = 2 (18-7)

EJERCICIO N° 19

En un laboratorio para pruebas de flotación(4) que utilizó las máquinas para laboratorio de flotación Denver # D-2 o d-12, se lograron los siguientes resultados para optimizar la recuperación y el grado de una muestra particular de carbón:

Gravedad específica de sólidos secos = 1,5

% sólidos de alimentación a la máquina (laboratorio) = 6,0

Tiempo de retención en la flotación = 2,4 min.

Asumir que en la planta se procesarán 100 toneladas cortas de carbón por hora, y que se utilizan aproximadamente 15% del volumen en aire en cualquier momento en una celda y que además se especifican celdas de 500 ft³ para esta flotación.

PREGUNTAS

1. Determinar el factor de escala para el tiempo de retención entre el laboratorio y la planta, así como el tiempo de retención en planta.
2. Determinar el número de celdas y el número de pilas o baterías para conducir la operación.

SOLUCION

1.

Utilizando datos tabulados (4), se puede calcular el factor de escala entre el laboratorio y la planta, así como el tiempo de retención en planta:

Para el carbón:

Tiempo usual de retención:

En laboratorio = 2 a 3 min.

En planta = 3 a 5 min.

Tiempo promedio de retención:

En laboratorio = $(2+3)/2 = 2,5$ min.

En planta = $(3+5)/2 = 4,0$ min.

Factor de escala = $4/2,5 = 1,6$

Factor de escala = 1,6 (19-1)

Tiempo de retención en planta = $2,4 \times 1,6 = 3,84$

Tiempo de retención en planta = 3,84 min. (19-1)

2

Utilizando datos experimentales (5):

Para:

Gravedad específica de sólidos = 1,5

% sólidos por peso = 6

Se encuentra en tablas (5):

$(\text{ft}^3 \text{ de pulpa/min.}) \cdot (\text{tonelada de sólidos/hr}) = 8,78$

Flujo de pulpa para la sección de flotación = $(100 \text{ ton sólidos/hr}) (8,78 \text{ ft}^3 \text{ pulpa min.})$
 $(\text{hr/ton.sólidos}) = 878 \text{ ft}^3 \text{ pulpa/min.}$

Flujo de pulpa aireada = $878/0,85 = 1033 \text{ ft}^3 \text{ pulpa/min.}$

Pulpa total requerida = $(1033 \text{ ft}^3 \text{ min}) \times 3,84 \text{ min} = 3967 \text{ ft}^3$

total de celdas = $(3967 \text{ ft}^3)/(500 \text{ ft}^3/\text{celda}) = 7,934$

total de celdas = 8 (19-2)

Utilizando tablas (4), se especifica el # de celdas de flotación por pila, para flotación de desbaste del carbón; y está entre 3 y 6 celdas por pila. Si asumimos 4

de pilas = $(8 \text{ celdas}) / (4 \text{ celdas/pila}) = 2 \text{ pilas}$

Se especifican 2 pilas de a 4 celdas c/u (19-2)

EJERCICIO N° 20 (3)

PREGUNTAS

1. A partir de los datos que se relacionan abajo, determinar las cantidades estequiométricas necesarias para preparar 10 gramos de xantato sec-butílico de potasio (Z-8), partir de alcohol sec-butílico, bisulfuro de carbono y KOH. Este xantato fue utilizado como colector en la flotación del mineral de cobre de las minas de Aroa.

Datos del producto:

Sec-butanol (C_4H_9OH):

Densidad = $0,81 \text{ g/cm}^3$

Pureza = 99,5%

Peso molecular = 74,1224

Bisulfuro de carbono (CS_2):

Densidad = $1,26 \text{ g/cm}^3$

Pureza = 99,5%

Peso molecular = 76,131

Hidróxido de potasio (KOH):

Pureza = 86,0%

Peso molecular = 56,1056

SOLUCION

1.
La reacción es la siguiente:



Xantato = $C_4H_9O-CS-S-K$

Cantidades de reactivos:

$$\text{Sec-butanol} = 10 \cdot (74,1224 / 188,34388) \cdot (1/0,995) \cdot (1/0,81) = 4,883 \text{ cm}^3$$

$$\text{Sec-butanol} = 4,883 \text{ cm}^3 (20-1)$$

$$\text{Hidróxido de K} = 10 \cdot (56,1056 / 188,3438) \cdot (1/0,86) = 3,464$$

$$KOH = 3,464 \text{ g. (20-1)}$$

$$\text{Bisulfuro de C} = 10 \cdot (76,131 / 188,3438) \cdot (1/0,995) \cdot (1/1,26) = 3,224$$

$$CS_2 = 3,224 \text{ cm}^3 (20-1)$$

EJERCICIO N° 21

En la flotación del mineral de cobre de las minas de Aroa, se utilizó como reactivo colector el xantato etílico de potasio (Z-3) en solución del 10% y a una dosis de 0,05 lbs/ton de mineral.

Experimentalmente se determinó (3) que el peso de una gota de este reactivo fue de 0,0166 g.

PREGUNTAS

1. Calcular el número de gotas a alimentar a la celda para una prueba con mineral sin deslamar (= 1037,42 g).

SOLUCION

1.

Llevamos el consumo g/ton.

$$\text{Dosis} = 0,05(\text{lb/ton}) \cdot 0,4536(\text{Kg/lb}) \cdot 1000(\text{g/Kg}) = 22,68 \text{ g/ton.}$$

$$\text{Consumo de Z-3} = 22,68(\text{g/ton}) \cdot (1 \text{ ton } 10^6 \text{ g}) / 1037,42 \text{ g} = 0,02353 \text{ g/prueba}$$

Dado que la solución es al 10%:

$$Z-3 \text{ en 1 gota} = 0,0166 \times 0,1 = 0,00166 \text{ g.}$$

$$\# \text{ de gotas} = 0,02353 / 0,00166 = 14,14$$

$$\# \text{ de gotas por prueba} = 14 (21-1)$$

EJERCICIO N° 22

Al experimentar la flotación del mineral de cobre de las minas de Aroa (3), en una prueba se cargaron a la celda 1045,67 gramos de mineral previamente deslamado, el cual contenía 16,19% Cu. Los resultados presentaron un concentrado que contenía 16,19% Cu y las colas 0,88% Cu.

PREGUNTAS

1. ¿cuál resultó ser el peso del concentrado?
2. ¿Cuál resultó ser el peso de las colas?
3. ¿Cuál fue la razón de concentración?
4. ¿Cuál fue la recuperación?

SOLUCION

1.

De nuevo recordemos que:

F = peso de la alimentación a la celda = 1045,67 g

C = peso del concentrado = ?

T = peso de las colas = ?

f = % del metal de interés en la alimentación = 1,98%

c = % del metal de interés en el concentrado = 16,69%

t = % del metal de interés en las colas = 0,88%

K = razón de concentración (peso de alimentación necesario para producir una unidad de peso en el concentrado)

R = recuperación

De la ecuación (23), podemos despejar:

$$C = \frac{F}{K} = F \frac{f-t}{c-t} = 1045,67 \frac{1,98 - 0,88}{16,19 - 0,88} = 75,13$$

$$C = 75,13 \text{ g (22-1)}$$

2.

$$T = F - C = 1045,54 - 75,13 = 970,54$$

$$T = 970,54 \text{ g (22-2)}$$

3

Recordando la ecuación (22).

$$K = \frac{c-t}{f-t} = \frac{16,19 - 0,88}{1,98 - 0,88} = 13,92 \text{ (22-3)}$$

Se prueba mediante la (23):

$$K = F/C = 1045,67/75,13 = 13,92 \text{ (22-3)}$$

$K = 13,92$ toneladas de alimentación por tonelada de concentrado

4

La recuperación la calculamos con cualquier forma de la ecuación (25)

$$R = \frac{100c}{Kf} = \frac{100 \times 16,19}{13,92 \times 1,98} = 58,74\%$$

$$R = \frac{100c(f-t)}{f(c-t)} = \frac{100 \times 16,19(1,98 - 0,88)}{1,98(16,19 - 0,88)} = 58,75\%$$

$$R = 58,75\% \text{ (22-4)}$$

EJERCICIO N° 23

El mineral de cobre de las minas de Aroa sin deslamar presentó una gravedad específica de 2,71 (3)

Con este material se elaboró una pulpa que tenía 10% de sólidos por peso, a objeto de someterla a una operación de flotación en una celda Denver Sub-A N°5. Esta celda fue llenada con pulpa hasta .5 pulgadas del labio, presentando un volumen efectivo de 9,92 litros.

PREGUNTAS

1. Relación agua a sólidos por peso?
2. Gravedad específica de la pulpa?
3. La constante de sólidos?
4. El peso de un litro de pulpa en gramos?
5. El peso del mineral seco (gramos), en un litro de pulpa?
6. El porcentaje de sólidos por volumen?
7. El volumen del sólido?
8. El volumen de agua?
9. El peso del sólido?

SOLUCION

1.

Recordando la ecuación (19)

B = relación agua sólidos por peso

A = % de sólidos por peso

$$B = \frac{100 - A}{A} = \frac{100 - 10}{10} = 9$$

$$B = 9.00:1 \text{ (23-1)}$$

2.

Recordando la ecuación (20):

S = gravedad específica de la pulpa

G = gravedad específica del sólido en la pulpa

$$S = \frac{1 + B}{B + \frac{1}{G}} = \frac{1 + 9}{9 + \frac{1}{2.71}} = 1.067$$

$$S = 1.067 \text{ (23-2)}$$

3.

Sea

K' = constante de sólidos

$$K' = \frac{G - 1}{G} \quad (26)$$

$$K' = (2.71 - 1) / 2.71 = 0.631$$

$$K' = 0.631 \text{ (23-3)}$$

4.

Sea

W' = peso de un litro de pulpa en gramos

$$W' = \frac{100000}{100 - AK'} \quad (27)$$

$$W' = 100000 / (100 - 10 \times 0.631) = 1067.35$$

$$W' = 1067.35 \text{ g. (23-4)}$$

5.

$$L' = \frac{W' - 1000}{K'} \quad (28)$$

L' = peso del mineral seco (gramos), en un litro de pulpa

$$L' = (1067.35 - 1000) / 0.631 = 106.73$$

$$L' = 106.73 \text{ g. (23-5)}$$

6
Aplicando la ecuacion (21):

$$V = Ax(S/G) = 10x(1,067/2,71) = 3,94$$
$$V = 3,94\% \text{ (23-6)}$$

7

$$\text{Volumen del sólido} = 9,72 \times 0,0394 = 0,383 \text{ lts}$$
$$\text{Volumen del sólido} = 0,383 \text{ lts. (23-7)}$$

8

$$\text{Volumen de agua} = 9,72 - 0,383 = 9,337 \text{ lts}$$
$$\text{Volumen de agua} = 9,337 \text{ lts (23-8)}$$

9

Aplicando (4):

$$\text{Peso del sólido} = 0,383 \times 1000 \times 2,71 = 1037,93$$
$$\text{Peso del sólido} = 1037,42 \text{ g. (23-9)}$$

EJERCICIO N° 24

PREGUNTAS

Realizar los mismos cálculos del ejercicio anterior pero con el mineral deslamado, presentando una gravedad específica de 3,474

SOLUCION

1.

Utilizando la ecuación (19):

La relación agua/sólido por peso (B):

$$B = (100-10)/10 = 9$$

$$B = 9:1 \text{ (24-1)}$$

2

Utilizando (20), calculamos la gravedad específica de la pulpa (S)

$$S = \frac{1+9}{9 + \frac{1}{3,474}} = 1,077$$

$$S = 1,077 \text{ (24-2)}$$

3.

Aplicando (26) calculamos la constante de sólidos (K^1):

$$K^1 = (3,474-1)/3,474 = 0,7121$$

$$K^1 = 0,7121 \text{ (24-3)}$$

4

Utilizando (27) calculamos el peso de un litro de pulpa en gramos (W^1)

$$W^1 = \frac{100000}{100 - 10 \times 0,7121} = 1076,67$$

$$W^1 = 1076,67 \text{ g (24-4)}$$

5.

Con ayuda de (28) calculamos el peso de mineral seco en un litro de pulpa (L^1):

$$L^1 = (1076,67-1000)/0,7121 = 107,67$$

$$L^1 = 107,67 \text{ g (24-5)}$$

6.

El % de sólidos por volumen (V), se calcula por medio de (21):

$$V = 10 \times (1,077/3,474) = 3,10$$

$$V = 3,10\% \text{ (24-6)}$$

7

$$\text{Volumen del sólido} = 9,72 \times 0,031 = 0,301 \text{ lts}$$

$$\text{Volumen del sólido} = 0,301 \text{ lts. (24-7)}$$

8

$$\text{Volumen de agua} = 9,72 - 0,301 = 9,419$$

$$\text{Volumen de agua} = 9,419 \text{ lts (24-8)}$$

9

Aplicando (4) podremos calcular el peso del sólido:

$$\text{Peso del sólido} = 0,301 \times 1000 \times 3,474 = 1045,67$$

$$\text{Peso del sólido} = 1045,67 \text{ g (24-9)}$$

EJERCICIO N° 25

Un circuito de flotación para mineral de cobre está formado por una etapa de flotación primaria y una de limpieza acoplados (ver Fig.4).

En el sistema de limpieza, las colas analizan 18% de calcopirita (CuFeS_2) y son recicladas al sistema de flotación primaria.

La carga circulante está formada por alimentación fresca y alimentación reciclada y la relación entre ellas es de 0,20.

La alimentación nueva o fresca contiene 9,5% de CuFeS_2 , y es alimentada a razón de 1000t/hr

PREGUNTAS

1. Calcular los pesos y los análisis de las demás corrientes.

SOLUCION

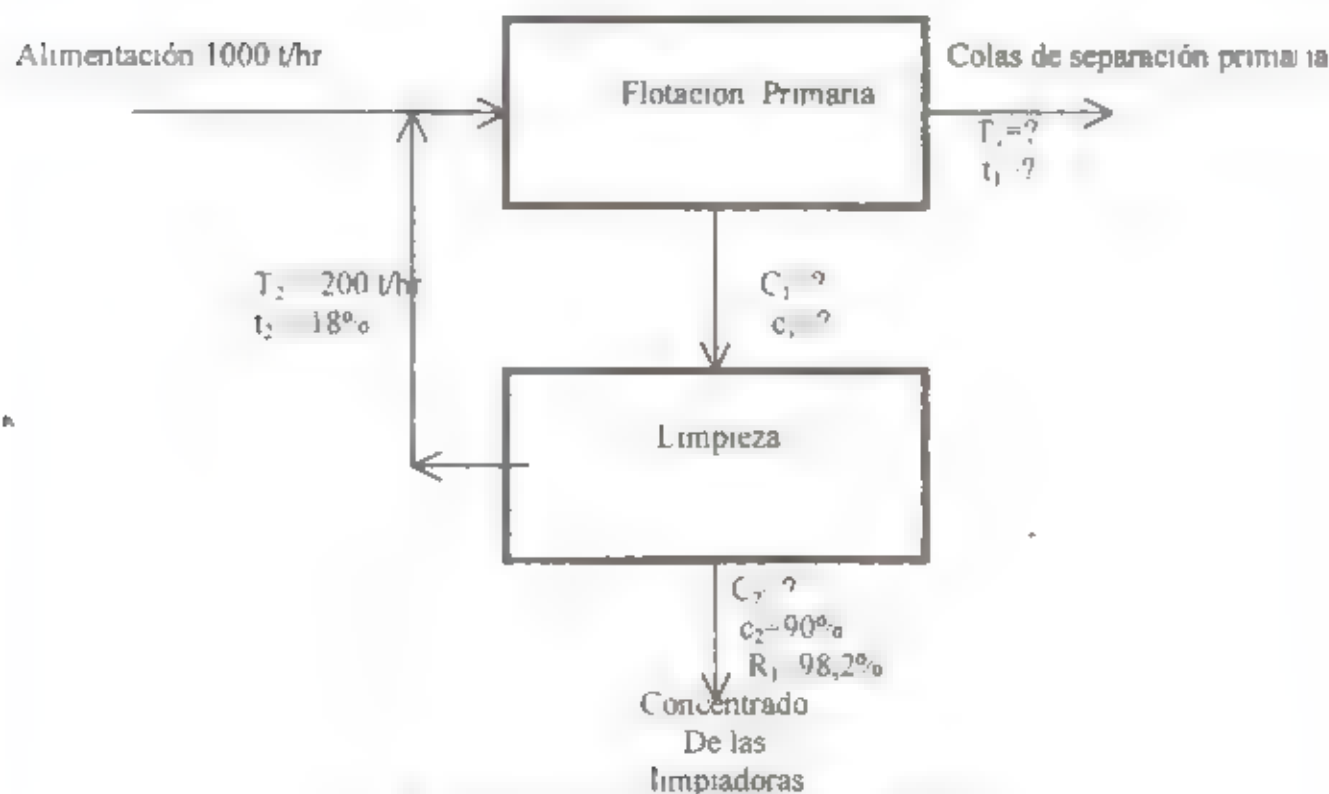


Figura N° 4: Operación de flotación en etapas.

Sea

C_1 = peso del concentrado de flotación primaria

T_1 = peso de las colas de flotación primaria

c_1 = ley del concentrado de flotación primaria

t_1 = ley de las colas de flotación primaria

C_2 = peso del concentrado de la etapa de limpieza

T_2 = peso de las colas de la etapa de limpieza

c_2 = ley del concentrado de la etapa de limpieza

Balance de masa total en la flotación primaria:

$$1000 + 200 = C_1 + T_1 \quad (a)$$

Balance de masa total en la etapa de limpieza:

$$C_1 = 200 + C_2 \quad (b)$$

Balance parcial para CuFeS_2 en flotación primaria:

$$1000 \times 9,5\% + 200 \times 18\% = C_1 \cdot c_1 + T_1 \cdot t_1 \quad (c)$$

Balance parcial para CuFeS_2 en la etapa de limpieza:

$$C_1 \cdot c_1 = C_2 \cdot 90\% + 200 \cdot 18\% \quad (d)$$

R_1 = razón de concentración

R_1 = relación entre masa de CuFeS_2 en el concentrado de limpieza y en

Alimentación fresca, multiplicada por 100 = 98,2%

$$98,2\% = \{(C_2 \cdot 90\%) / (1000 \cdot 9,5\%)\} \cdot 100 \quad (e)$$

Resolviendo (e):

$$C_2 = 98,2 \times 1000 \times 9,5 / 100 \times 90 = 103,66 \text{ t/hr. (25-1)}$$

Sustituyendo en (b).

$$C_1 = 200 + 103,66 = 303,66 \text{ t/hr. (25-1)}$$

Sustituyendo este valor en (a):

$$T_1 = 1200 - 303,66 = 896,34 \text{ t/hr (25-1)}$$

Reemplazando en (d):

$$c_1 = (103,66 \times 90 + 288 \times 18) / 303,66 = 42,58\% \text{ (25-1)}$$

Dando valores a (c):

$$t_1 = \{(1000 \times 9,5 + 200 \times 18) - (303,66 \times 42,58)\} / 896,34 = 0,19\% \text{ (25-1)}$$

EJERCICIO N° 26

Un concentrador por flotación (6), se alimenta con 1040,64 Kg./hr de un mineral que contiene 2,76% de calcopirita (CuFeS_2).

Los análisis de los productos finales fueron los siguientes (ver Fig.5):

Concentrado..... 10,35% CuFeS_2

Colas..... 1,61% CuFeS_2

PREGUNTAS

- I Calcular las cantidades de los productos finales obtenidos por hora de operación

SOLUCION

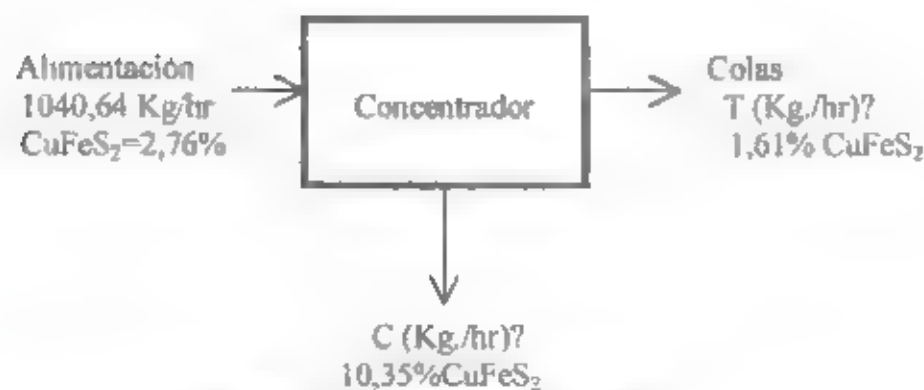


Figura N° 5: Esquema de flotación

Sea

F = alimentación al sistema de flotación

C = concentrado

T = colas de flotación

Balance general

$$F = C + T$$

$$1040,64 = C + T \quad (a)$$

La calcopirita que se alimenta, se distribuye en el concentrado y las colas, por tanto, su balance será,

$$1040,64 \times 0,0276 = 0,1035C + 0,0161T \quad (b)$$

Despejando de (a):

$$T = 1040,64 - C$$

Sustituyendo en (b):

$$1040,64 \times 0,0276 = 0,1035C + 0,0161(1040,64 - C)$$

$$C = (1040,64 \times 0,0276 - 0,0161 \times 1040,64) / (0,1035 - 0,0161) = 136,93$$

$$T = 1040,64 - 136,93 = 903,71$$

$$C = 136,93 \text{ Kg./hr (26-1)}$$

$$T = 903,71 \text{ Kg./hr (26-1)}$$

EJERCICIO N° 27

Con los datos del ejercicio anterior:

PREGUNTAS

1. Determinar los flujos horarios del cobre en la alimentación, el concentrado y las

colas

SOLUCION

1.

Peso atómico del Cu = 64

Peso molecular del CuFeS_2 = 184

$$\text{Cu en alimentación} = 1040,64 \times 0,0276 \cdot (64/184) = 9,99$$

$$\text{Cu en concentrado} = 136,93 \times 0,1035 \cdot (64/184) = 4,93$$

$$\text{Cu en colas} = 903,71 \times 0,0161 \cdot (64/184) = 7,06$$

Así el flujo será:

$$\text{Cu en alimentación} = 9,99 \text{ Kg./hr (27-1)}$$

$$\text{Cu en concentrado} = 4,93 \text{ Kg./hr (27-1)}$$

$$\text{Cu en colas} = 5,06 \text{ Kg./hr (27-1)}$$

CAPITULO III

REACIONES QUIMICAS ESTEQUIOMETRIA REACCIONES CON GASES

EJERCICIO N°1 (7)

Un convertidor de cobre recibe una carga de 60 toneladas métricas de mata que contiene 54% de FeS. El FeS es oxidado por soplo de aire al convertidor, de acuerdo a la siguiente reacción:

$$2 \text{FeS} + 3 \text{O}_2 = 2 \text{FeO} + 2 \text{SO}_2$$

El aire contiene 21% de oxígeno en volumen, una tonelada métrica tiene 1000 Kg.

PREGUNTAS

1. Calcular el volumen total de aire necesario.
2. Calcular el volumen de SO_2 formado.
3. Calcular los kilogramos de FeO formados.
4. Calcular el peso de la escoria formada, en toneladas métricas, si el FeO constituye el 65% de la escoria.

SOLUCION

1. Para resolver este punto, debemos calcular el oxígeno requerido por la reacción, para luego convertirlo en aire:

Pesos atómicos:

$$\text{O} = 16, \text{Fe} = 56, \text{S} = 32$$

Una mol de gas, expresada en kilogramos, ocupa 22,4 m³

Pesos moleculares

$$\text{FeS} = 56 + 32 = 88$$

$$\text{FeO} = 56 + 16 = 72$$

$$\text{SO}_2 = 32 + 2 \times 16 = 64$$

De acuerdo a la reacción

2x88 Kg. de FeS reaccionan con 3x22,4 m³ de O₂, los 32400 Kg. de FeS, lo harán con x

$$x = \text{O}_2 = 32400 \times 67,2 / 176 = 12371 \text{ m}^3 \approx 12400$$

$$\text{Aire} = 12400 / 0,21 = 58910 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire requerido} = 58910 \text{ m}^3 \text{ (1-1)}$$

2.

El razonamiento utilizado para calcular el O₂ a partir del FeS, es válido para calcular el SO₂:

$$\text{SO}_2 = 32400 \times 2 \times 22,4 / 176 = 8247,3 \text{ m}^3$$

A este mismo resultado se llega, comparando el O₂ con el SO₂, debido a que por estar ambos en estado gaseoso, se relacionan mol a mol, así:

3x22,4 m³ de O₂ producen 2x22,4 m³ de SO₂, cuantos m³ de este, producirán 12371 m³ de O₂?

$$\text{SO}_2 = 12371 \cdot (2 \times 22,4 / 3 \times 22,4) = 8247,3 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de SO}_2 = 8247,3 \text{ m}^3 \text{ (1-2)}$$

3.

2x88 Kg. de FeS producen 2x72 Kg. de FeO, cuanto FeO producirán los 32400 Kg. de FeS?

$$\text{FeO} = 32400 \cdot (144 / 176) = 26510 \text{ Kg.}$$

$$\text{FeO formado} = 26510 \text{ Kg. (1-3)}$$

4.

$$\text{FeO formado} = 26510 \text{ Kg.} = 26,51 \text{ ton.}$$

$$\text{Escoria formada} = 26,51 / 0,65 = 40,78 \text{ ton.}$$

$$\text{Escoria formada} = 40,78 \text{ ton. (1-4)}$$

EJERCICIO N° 2 (7)

El óxido de hierro es reducido a hierro en un horno eléctrico, de acuerdo a la siguiente reacción:



PREGUNTAS

1. Los kilogramos de Fe₂O₃ que deben ser reducidos para producir una tonelada métrica de Fe.

2. Los kilogramos de carbono requeridos.
3. Los metros cúbicos de CO y CO₂, producidos a condiciones normales.
4. Los kilogramos de CO y CO₂ producidos.

SOLUCION

1

Pesos atómicos

$$\text{Fe} = 56, \text{C} = 12, \text{O} = 16.$$

Pesos moleculares.

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 56 \times 2 + 16 \times 3 = 160$$

$$\text{CO} = 12 + 16 = 28$$

$$\text{CO}_2 = 12 + 2 \times 16 = 44$$

1 tonelada métrica = 1000 Kg.

A condiciones normales, una mol de gas expresada en Kg. ocupa 22,4 m³.

4x160 Kg de Fe₂O₃ producen de acuerdo a la reacción 8x56 Kg de Fe cuanto Fe₂O₃ se requerirán para producir 1000 Kg. Fe?

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1000 \cdot (160 \times 4 / 8 \times 56) = 1428,6$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ reducido} = 1428,6 \text{ Kg. (2-1)}$$

2.

4x160 Kg de Fe₂O₃ reaccionan con 9x12 Kg. de C. de acuerdo a la reacción Con cuanto C reaccionarán los 1428,6 Kg. de Fe₂O₃ reducidos?

$$\text{C} = 1428,6 \cdot (9 \times 12 / 4 \times 160) = 241$$

$$\text{C requerido} = 241 \text{ Kg. (2-2)}$$

3

8x56 Kg de Fe se producen junto con 6x22,4 m³ de CO. Cuanto CO se producirá en condiciones normales cuando se produzcan 1000 Kg. de Fe?

$$\text{CO} = 1000 \cdot (6 \times 22,4 / 8 \times 56) = 300$$

$$\text{CO}_2 = 1000 \cdot (3 \times 22,4 / 6 \times 22,4) = 150$$

$$\text{CO producido (CN)} = 300 \text{ m}^3 \text{ (2-3)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ producido (CN)} = 150 \text{ m}^3 \text{ (2-3)}$$

4

6x28 Kg de CO equivalen a 2x22,4 m³ de este gas. 300 m³ a cuantos Kg. equivaldrán?

$$\text{CO} = 300 \cdot (6 \times 28 / 6 \times 22,4) = 375$$

$$\text{CO}_2 = 150 \cdot (44 / 22,4) = 294,6$$

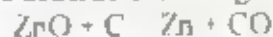
$$\text{CO} = 375 \text{ Kg. (2-4)}$$

$$\text{CO}_2 = 294,6 \text{ Kg. (2-4)}$$

EJERCICIO N° 3 (7)

Una carga en una retorta de zinc produce 50 libras de zinc. La carga consiste de un mineral que contiene 56% ZnO, 44% ganga y carbón que contiene 90% C y 10% cenizas.

La reducción tiene lugar de acuerdo con la siguiente reacción:



Se utiliza suficiente carbón como para consumir 5 veces tanto C como el que requiere la reacción.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral en la carga, en libras.
2. El porcentaje de carbón en la carga.
3. El volumen de CO expulsado, en pie cúbico.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos.

$$\text{Zn} = 65, \text{C} = 12, \text{O} = 16$$

Pesos moleculares.

$$\text{ZnO} = 65 + 16 = 81$$

$$\text{CO} = 12 + 16 = 28$$

En condiciones normales, una mol de un gas (expresada en libras), ocupa 359 pies cúbicos.

De acuerdo a la estequiometría de la reacción 65 libras de Zn son producidas por 81 libras de ZnO, para producir 50 lbs de Zn se necesitan:

$$\text{ZnO} = 50 \cdot (81/65) = 62,3 \text{ lbs}$$

$$\text{Mineral} = 62,3/0,56 = 111$$

$$\text{Mineral} = 111 \text{ lbs (3-1)}$$

2

Calculamos el C de la reacción:

12 lbs de C producen 65 de Zn, las 50 lbs de Zn necesitarán:

$$\text{C} = 50 \cdot (12/65) = 9,22 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total C cargado} = 9,22 \times 5 = 46,1 \text{ Lbs.}$$

$$\text{Total carbón en la carga} = 46,1/0,9 = 51,3 \text{ lbs.}$$

$$\text{Carga total} = 111 + 51,3 = 162,3 \text{ lbs.}$$

$$\text{Carbón en la carga} = (51,3/162,3) \cdot 100 = 31,5\%$$

$$\text{Carbón en la carga} = 31,5\% \text{ (3-2)}$$

3.

De acuerdo a la reacción, 12 lbs de C producen una mol (359 ft³) de CO, las 9,22 lbs de C deberán producir:

$$\text{CO} = 9,22 \cdot (359/12) = 275,8$$

$$\text{CO expulsado} = 275,8 \text{ ft}^3 \text{ (3-3)}$$

EJERCICIO N° 4 (7)

Se reduce plomo a partir de la galena (PbS) en un horno de hogar para minerales, por reacción del PbS con PbO en una reacción, y del PbS con PbSO₄ en otra reacción. En ambos casos se forman Pb y SO₂, pero se producen 3 veces más Pb por la reacción del PbO que por la del PbSO₄, las dos reacciones tienen lugar simultáneamente.

El peso del PbS reducido en las dos reacciones es de 6600 Kg.

PREGUNTAS

1. El peso total de plomo (Pb) resultante de las dos reacciones, y el peso (Kg) y el volumen (m³) del SO₂ producido.
2. Los porcentajes de PbO y PbSO₄ contenidos en la mezcla PbS-PbO-PbSO₄.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{Pb} = 207, \text{S} = 32, \text{O} = 16$$

Pesos moleculares:

$$\text{PbS} = 207 + 32 = 239$$

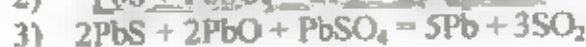
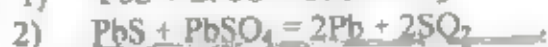
$$\text{PbO} = 207 + 16 = 223$$

$$\text{PbSO}_4 = 207 + 32 + 16 \times 4 = 303$$

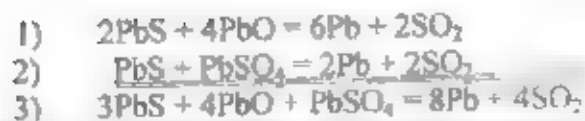
$$\text{SO}_2 = 32 + 16 \times 2 = 64$$

En condiciones normales, una mol de un gas (en Kg), ocupa 22,4 m³ de volumen.

Dado que las reacciones ocurren simultáneamente, las podemos representar en una sola, así:



En razón de que el Pb en (1) es 3 veces el Pb en (2), las reacciones se pueden volver a escribir



Dado que disponemos de 6600 Kg. de PbS, utilizando la estequiometria de la reaccion (3) se puede calcular el peso total del Pb producido, al igual que el peso y el volumen del SO_2

$$\begin{aligned}
 \text{Pb total} &= 6600 \cdot (8 \times 207 / 3 \times 239) = 15243,5 \text{ Kg.} \\
 \text{Peso total del Pb} &= 15243,5 \text{ Kg. (4-1)} \\
 \text{Peso del SO}_2 &= 6600 \cdot (4 \times 64 / 3 \times 239) = 2356,5 \text{ Kg.} \\
 \text{Peso del SO}_2 &= 2356,5 \text{ Kg. (4-1)} \\
 \text{Volumen del SO}_2 &= 2356,5 \cdot (22,4 / 64) = 824,8 \text{ m}^3 \\
 \text{Volumen del SO}_2 &= 824,8 \text{ m}^3 \text{ (4-1)}
 \end{aligned}$$

2.

De nuevo, para calcular los respectivos pesos de PbO y PbSO_4 , recurrimos a el balance estequiométrico de la reacción (3):

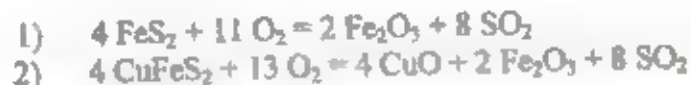
$$\begin{aligned}
 \text{Peso del PbO} &= 6600 \cdot (4 \times 223 / 3 \times 239) = 8210,9 \text{ Kg} \\
 \text{Peso del PbSO}_4 &= 6600 \cdot (303 / 3 \times 239) = 2789,1 \text{ Kg.} \\
 \text{Carga total} &= \text{PbS} + \text{PbO} + \text{PbSO}_4 \\
 \text{Carga total} &= 6600 + 8210,9 + 2789,1 = 17600 \text{ Kg.} \\
 \text{PbO} &= 100 \cdot (8210,9 / 17600) = 46,6\% \\
 \text{PbSO}_4 &= 100 \cdot (2789,1 / 17600) = 15,8\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PbO} &= 46,6\% \text{ (4-2)} \\
 \text{PbSO}_4 &= 15,8\% \text{ (4-2)}
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N° 5

Un mineral de cobre contiene 6%Cu y 35%S.

El mineral de cobre es calcopirita (CuFeS_2), y el S tambien esta presente como pirita de hierro (FeS_2). El resto del mineral es ganga que no contiene Cu, Fe ni S.
Este mineral es tostado hasta que todo el S sea removido de conformidad con las reacciones siguientes:



La cantidad de oxigeno suministrada al horno (contenido en el aire), es 200% en exceso de la cantidad demandada por las reacciones.

PREGUNTAS

- 1 El peso en libras de Cu de las especies minerales mencionadas y tambien de la ganga, en una tonelada corta de mineral.
- 2 Los pies cubicos de oxigeno, requerido por las reacciones en la tostación de una tonelada corta de mineral.
- 3 Los pies cubicos de aire realmente suministrado, por tonelada de mineral.
- 4 El peso total de Fe_2O_3 , y el volumen total de SO_2 producidos en la tostación de una tonelada de mineral.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{Fe} = 56, \text{S} = 32, \text{O} = 16, \text{Cu} = 64$$

Pesos moleculares

$$\text{FeS}_2 = 56 + 32 \times 2 = 120$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 56 \times 2 + 16 \times 3 = 160$$

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 &= 32 + 16 \times 2 = 64 \\ \text{CuFeS}_2 &= 64 + 56 + 32 \times 2 = 184 \\ \text{CuO} &= 64 + 16 = 80 \end{aligned}$$

1 tonelada corta = 2000 lbs.

En C.N., el peso molecular de un gas, en libras, ocupa 359 ft³

Dado que conocemos la cantidad de Cu cargada y este solo se encuentra como calcopirita, podemos determinar al peso de esta especie mineral:

$$\text{Cu total cargado} = 2000 \times 0,06 = 120 \text{ lbs.}$$

$$\text{S total cargado} = 2000 \times 0,35 = 700 \text{ lbs.}$$

$$\text{CuFeS}_2 = 120 \cdot (184/64) = 345 \text{ lbs.}$$

$$\text{CuFeS}_2 = 345 \text{ lbs (5-1)}$$

En la carga, el S que no se encuentra como CuFeS₂, se encuentra como pirita (FeS₂), de manera que si determinamos el S de la pirita, también podemos determinar su peso.

$$\text{S en CuFeS}_2 = 345 \cdot (64/184) = 120 \text{ lbs}$$

$$\text{S en FeS}_2 = 700 - 120 = 580 \text{ lbs}$$

$$\text{FeS}_2 = 580 \cdot (120/64) = 1088 \text{ lbs.}$$

$$\text{FeS}_2 = 1088 \text{ lbs. (5-1)}$$

$$\text{Ganga Mineral total-CuFeS}_2\text{-FeS}_2$$

$$\text{Ganga} = 2000 - 1088 - 345 = 567 \text{ lbs.}$$

$$\text{Ganga} = 567 \text{ lbs. (5-1)}$$

2.

Debemos determinar el oxígeno requerido por c/u de las reacciones por separado, y luego establecer la sumatoria:

En la reacción (1):

$$\text{O}_2 = 1088 \cdot (11 \times 359 / 4 \times 120) = 8951,1 \text{ ft}^3$$

En la reacción (2):

$$\text{O}_2 = 345 \cdot (13 \times 359 / 4 \times 184) = 2187,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ total requerido por las reacciones de tostación} = 8951,1 + 2187,7 = 11138,8 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ de reacciones} = 11138,8 \text{ ft}^3 \text{ (5-2)}$$

3.

Dado que el aire contiene 21% O₂ en volumen, y el del exceso fue 2 veces (200%) del requerido por las reacciones, el aire total será:

$$\text{Aire total} = 3 \cdot (11138,8 / 0,21) = 159126 \text{ ft}^3.$$

$$\text{Aire realmente utilizado} = 159126 \text{ ft}^3 \text{ (5-3)}$$

4.

Debemos determinar respectivamente el Fe₂O₃ y el SO₂ para c/u de las reacciones, tomando como referencias el CuFeS₂, el FeS₂ y el oxígeno, y establecer luego la sumatoria.

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ en (1)} = 1088 \cdot (2 \times 160 / 4 \times 120) = 725,3 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ en (2)} = 345 \cdot (2 \times 160 / 4 \times 184) = 150 \text{ lbs}$$

$$\text{Total Fe}_2\text{O}_3 = 725,3 + 150 = 875,3 \text{ lbs.}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ total} = 875,3 \text{ lbs. (5-4)}$$

$$\text{SO}_2 \text{ en (1)} = 8951,1 \cdot (8/11) = 6510 \text{ ft}^3$$

$$\text{SO}_2 \text{ en (2)} = 2187,7 \cdot (8/13) = 1346 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total SO}_2 = 6510 + 1346 = 7856 \text{ ft}^3$$

$$\text{SO}_2 \text{ total} = 7856 \text{ ft}^3 \text{ (5-4)}$$

EJERCICIO N° 6 (7)

Se produce aluminio por descomposición electrolítica del Al₂O₃, utilizando un ánodo de carbono.

El oxígeno liberado cuando se descompone el Al₂O₃, se combina con el carbono del ánodo. Asumir que 85% de los gases es CO y el 15% es CO₂.

La producción diaria de una celda es de 400 lbs de aluminio

PREGUNTAS

1. La reacción química que ocurre, balanceada con los números enteros mínimos.
2. Las libras de Al_2O_3 consumidos por día en cada celda.
3. Los pies cúbicos de CO y CO_2 producidos por día.

SOLUCION

1.

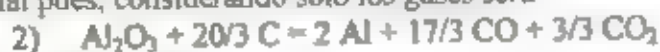
El balanceo natural de la reacción es el siguiente:



Se advierte que el 85% del gas es CO y el 15% es CO_2 , por tanto, estos gases deben aparecer en la reacción con la siguiente proporción:

$$\text{CO}:\text{CO}_2 = 85:15 = 5,6667 = 5 \cdot 2/3 = 17/3$$

El balanceo parcial pues, considerando solo los gases será



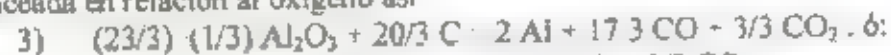
El balance para el oxígeno sería:

$$\text{Oxígeno del CO} = 17/3$$

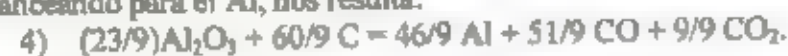
$$\text{Oxígeno del CO}_2 = (3/3) \times 2 = 6/3$$

$$\text{Total oxígeno en gases} = 17/3 + 6/3 = 23/3$$

Dado que el Al_2O_3 contiene 3 átomos de oxígeno, los 23/3 debemos dividirlos por 3, y la reacción quedaría balanceada en relación al oxígeno así



Si expresamos todos los quebrados en novenos, multiplicando y dividiendo por 9 a las que contienen tercios, y balanceando para el Al, nos resulta:



Si multiplicamos todo por 9.



Como todos los coeficientes estequiométricos son múltiplos de 9, puedo encontrar los mínimos números enteros, dividiendo otra vez por 9:



2.

Pesos atómicos.

$$\text{Al} = 27, \text{O} = 16, \text{C} = 12$$

Pesos moleculares

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 27 \times 2 + 16 \times 3 = 102$$

$$\text{CO} = 12 + 16 = 28$$

$$\text{CO}_2 = 12 + 16 \times 2 = 44$$

En C.N., una mol de gas expresada en libras, ocupa 359 ft^3 .

Si nos acogemos a las relaciones estequiométricas de (6), podemos calcular el peso de Al_2O_3 consumido por día en cada celda:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 400 \cdot (23 \times 102 / 46 \times 27) = 755,6 \text{ lbs.}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ consumido} = 755,6 \text{ lbs} \quad (6-2)$$

3

De nuevo, hacemos uso de las relaciones estequiométricas de (6)

$$\text{CO} = 400 \cdot (51 \times 359 / 46 \times 27) = 5896,62 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 = 400 \cdot (9 \times 359 / 46 \times 27) = 1040,58 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO producido por día} = 5896,62 \text{ ft}^3 \quad (6-3)$$

$$\text{CO}_2 \text{ producido por día} = 1040,58 \text{ ft}^3 \quad (6-3)$$

Se puede comprobar, que si el gas total es 6937,20 ft^3 , se sigue conservando la proporción inicial: CO = 85% y CO_2 = 15%.

EJERCICIO N° 7 (7)

El azufre contenido en el acero como FeS, es removido en un horno eléctrico por adición de cal y ferro-silicio, tiene lugar la siguiente reacción:



en la cual, el ferro-silicio está representado por Fe_xSi .

PREGUNTAS

1. Si el ferrosilicio contiene 50%Fe y 50%Si, que valor de "x" en la fórmula Fe_xSi satisfará esa composición?
2. Cuantas libras de cal y cuantas de ferro-silicio serán requeridas para remover 100 libras de azufre?

SOLUCION

1.
Pesos atómicos.

$$\text{Fe}=56, \text{Si}=28, \text{S}=32, \text{O}=16, \text{Ca}=40$$

Pesos moleculares.

$$\text{CaO} = 40+16 = 56$$

$$\text{CaS} = 40+32 = 72$$

$$\text{FeS} = 56+32 = 88$$

De acuerdo a la composición propuesta, debe cumplirse la siguiente relación

$$\text{Fe}(x) : \text{Si} = 50 : 50$$

$$56(x) : 28 = 50 : 50$$

$x = 28/56 = 0,5$, por tanto, el valor de x que se ajusta ala composicion será.

$$x = 0,5 \text{ (7-1)}$$

La fórmula del ferro-silicio será $\text{Fe}_{0,5}\text{Si}$.

2.

El peso molecular del ferro-silicio será:

$$\text{Fe}_{0,5}\text{Si} = 56 \times 0,5 + 28 = 56$$

Para calcular los pesos de la cal y del ferro-silicio consumidos, debemos recurrir a la estequiometría de la reacción:



En base al S removido, calculamos el CaS producido para poder relacionar con esta, las fórmulas de los compuestos solicitados, de acuerdo a como aparecen en la reacción ajustada:

$$\text{CaS producido} = 100 \cdot (72/32) = 225 \text{ lbs}$$

$$\text{CaO consumido} = 225 \cdot (56/72) = 175 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe}_{0,5}\text{Si consumido} = 225 \cdot (56/2 \times 72) = 87,5 \text{ lbs}$$

$$\text{CaO consumido} = 175 \text{ lbs (7-2)} \quad \checkmark$$

$$\text{Fe}_{0,5}\text{Si consumido} = 87,5 \text{ lbs (7-2)} \quad \checkmark$$

EJERCICIO N° 8 (7)

En un alto horno, la hematita (Fe_2O_3) es reducida por el monóxido de carbono, el cual es formado por la combustión del carbono en el coque por medio de un soplo de aire.

Las condiciones de equilibrio químico requieren que haya un exceso de CO presente para hacer que la reacción de reducción proceda de izquierda a derecha. La reacción puede estar representada de la manera siguiente:



En un cierto horno, la relación $\text{CO}:\text{CO}_2$ en los productos de la reacción arriba mencionada fue de 1,8:1, en volumen.

El horno redujo 800 toneladas métricas de hierro por día.

PREGUNTAS

1. La ecuación que representa la reducción, con CO y CO₂ formados en la relación 1,8 l, balanceada con los mínimos números enteros.
2. Los metros cúbicos de CO y CO₂ producidos por día.
3. El consumo teórico de coque, por tonelada métrica de Fe reducido, asumiendo que el coque contiene 90%C.
4. Los metros cúbicos del soplo (aire), necesarios para la combustión del carbono en el coque a CO; por tonelada de Fe reducido.
5. Si se carga al horno un peso de piedra caliza (CaCO₃) igual a 1,5 de la cantidad de Fe₂O₃ reducido, cual será la relación real de CO:CO₂ en los gases del horno, después de sumar el CO₂ resultante de la descomposición del CaCO₃ en CaO y CO₂?

SOLUCION

1

La relación CO:CO₂ es igual a 1,8:1, esto se puede escribir así:

CO:CO₂ = 1,8:1, o también

$$(x-3)/3 = 1,8$$

$$x = 3 \times 1,8 + 3 = 8,4.$$

La reacción se convierte entonces en



Si multiplicamos por 5 con el objeto de eliminar decimales, y expresar la reacción con los mínimos enteros, tendremos.



2.

Sabemos que una tonelada métrica = 1000 Kg, por tanto, el Fe reducido fue = 800000 Kg, y que en C.N, una mol de gas expresada en Kg, ocupa 22,4 m³, por tanto:

$$\text{CO producido por día} = 800000 \cdot (27 \times 22,4 / 10 \times 56) = 864000 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ producido por día} = 864000 \cdot (15 / 27) = 480000 \text{ m}^3$$

$$\text{CO producido por día} = 864000 \text{ m}^3 \quad (8-2)$$

$$\text{CO}_2 \text{ producido por día} = 480000 \text{ m}^3 \quad (8-2)$$

3.

Para determinar el consumo de coque, debemos calcular el C que se encuentra en CO y CO₂, una vez hecha esta determinación, consideramos el hecho de que el coque contiene 90%C. Para determinar el CO y el CO₂, procedemos como en los cálculos del punto anterior, solo que esta vez, el Fe reducido son 1000 Kg.

$$\text{CO producido} = 1000 \cdot (27 \times 22,4 / 10 \times 56) = 1080 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ producido} = 1000 \cdot (15 \times 22,4 / 10 \times 56) = 600 \text{ m}^3$$

$$\text{C en CO} = 1080 \cdot (12 / 22,4) = 578,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en CO}_2 = 600 \cdot (12 / 22,4) = 321,4 \text{ Kg.}$$

$$\text{C(total)} = 578,6 + 321,4 = 900 \text{ Kg.}$$

$$\text{Coque consumido} = 900 / 0,9 = 1000 \text{ Kg.}$$

$$\text{Coque consumido por tonelada métrica de Fe reducido} = 1000 \text{ Kg.} \quad (8-3)$$

4

El CO₂ producido, por tonelada métrica de Fe reducido se considera que proviene de la reacción de oxidación del CO, así.



$$\text{CO (total)} = 1080 + 600 = 1680 \text{ m}^3$$

En el alto horno, el C forma CO y parte de este luego forma CO₂, por tanto, el O₂ consumido proviene de la siguiente reacción



$$\text{O}_2 = \frac{1}{2}\text{CO} = 1680 \times 0,5 = 840 \text{ m}^3$$

Recordando que el aire contiene 21% O_2 en volumen:

$$\text{Aire necesario} = 840/0,21 = 4000 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire necesario para combustión del C} = 4000 \text{ m}^3 \text{ (8-4)}$$

5.

Debemos calcular el Fe_2O_3 cargado, a partir del Fe reducido para luego determinar el peso de la piedra caliza, luego descomponemos esta en CaO y CO_2 , este CO_2 se lo adicionamos al proveniente del CO para finalmente establecer la relación $CO:CO_2$.

Pesos atómicos:

$$C = 12, Ca = 40, Fe = 56, O = 16$$

Pesos moleculares:

$$Fe_2O_3 = 56 \times 2 + 16 \times 3 = 160$$

$$CaCO_3 = 40 + 12 + 16 \times 3 = 100$$

$$Fe_2O_3 \text{ cargado} = 800000 \cdot (160/112) = 1'142.857 \text{ Kg.}$$

$$CaCO_3 \text{ adicionada} = 1'142.857/5 = 228571 \text{ Kg.}$$

Reacción de descomposición:



$$CO_2 \text{ de esta reacción} = 228571 \cdot (22,4/100) = 51200 \text{ m}^3$$

$$\text{Total } CO_2 = 480000 + 51200 = 531200 \text{ m}^3$$

$$CO/CO_2 = 864000/531200 = 1,63$$

$$\text{Relación } CO:CO_2 = 1,63:1 \text{ (8-5)}$$

EJERCICIO N° 9 (7)

Una retorta para zinc es cargada con 70 Kg. de concentrado de Zn tostado, conteniendo 45% Zn presente como ZnO. La reducción tiene lugar de acuerdo con la reacción



1/5 del ZnO permanece sin reducir.

Los vapores de Zn y CO pasan a través de un condensador, del cual escapa el CO / se quema a CO_2 cuando sale de la boca del condensador

El CO entra al condensador a $300^\circ C$ y 700 mm de presión.

PREGUNTAS

1. El volumen de CO en metros cúbicos que entra al condensador (a) medido a condiciones normales, y (b) medido a las condiciones dadas.
2. El peso del CO en kilogramos.
3. El volumen de CO_2 formado cuando se quema el CO, medido a su temperatura de $750^\circ C$ y 765 mm de presión
4. El volumen (a condiciones normales), y el peso del aire utilizado para quemar el CO.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$Zn = 65, C = 12, O = 16$$

Pesos moleculares:

$$ZnO = 65 + 16 = 81$$

$$CO = 16 + 12 = 28$$

$$\text{Aire} = 29$$

Debemos calcular el peso del Zn y/o del ZnO que intervienen en la reacción de reducción y a partir de allí determinar el peso del CO a C N y luego pasarlo a las condiciones dadas.

$$Zn = 70 \times 0,45 = 31,5 \text{ Kg.}$$

$$ZnO \text{ de este} = 31,5 \cdot (81/65) = 39,2 \text{ Kg.}$$

$$ZnO \text{ reducido} = 39,2 \times (4/5) = 31,4 \text{ Kg.}$$

Este será el ZnO que interviene en la reacción, pues 1/5 permanece sin reducir

Los cálculos realizados en base a las relaciones estequiométricas de las reacciones, se supone que son a condiciones normales, así:

$$\text{CO} = 31,4 \cdot (22,4/81) = 8,68 \text{ m}^3$$

$$\text{CO (C.N)} = 8,68 \text{ m}^3 \text{ (9-1.a)}$$

Para realizar el cambio de estado, recordemos que si se asume un comportamiento ideal para estos gases, y en número de moles permanece constante, el cambio de estado se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

donde las condiciones (1) y (2) representan estados diferentes.

Sea el estado (1), las condiciones normales y las (2) las reales:

$$T_1 = 273\text{K} \quad , \quad T_2 = 273 + 300 = 573\text{K}$$

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad , \quad P_2 = 700 \text{ mm}$$

$$V_1 = 8,68 \text{ m}^3 \quad , \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$$

$$V_2 = 8,68 \cdot (760/273) \cdot (573/700) = 19,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen a condiciones reales} = 19,7 \text{ m}^3 \text{ (9-1.b)}$$

2

El peso del CO se calcula a partir de las condiciones normales, en base a su densidad o en base al hecho de que una mol de gas expresada en Kg., siempre ocupa un volumen de 22,4 m³, C N

$$\text{Densidad del CO} = 1,250 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{CO} = 8,68 \text{ m}^3 \times 1,250 \text{ (Kg/m}^3) = 10,85 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO} = 8,68 \text{ m}^3 \cdot (28 \text{ Kg}/22,4 \text{ m}^3) = 10,85 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del CO} = 10,85 \text{ Kg. (9-2)}$$

3.

La reacción para la combustión del CO es la siguiente:



A partir de la estequiometría de esta reacción (C.N) se puede deducir que el volumen de CO es el mismo que el del CO₂ = 8,68 m³, por tanto, para cambiar de estado podemos hacer uso de (1):

$$T_1 = 273\text{K} \quad , \quad T_2 = 750 + 273 = 1023\text{K}$$

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad , \quad P_2 = 765 \text{ mm}$$

$$V_1 = 8,68 \text{ m}^3 \quad , \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 8,68 \cdot (760/273) \cdot (1023/765) = 32,2 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ formado a condiciones dadas} = 32,2 \text{ m}^3 \text{ (9-3)}$$

4

Se puede deducir de la reacción de combustión del CO, que el volumen del O₂ = 1/2 CO = 8,68 x 0,5 = 4,34 m³. Con este valor podemos calcular el volumen de aire a C N tomando en cuenta que el 21% del volumen de aire es O₂, y el peso se puede determinar tomando en consideración que su densidad es = 1,293 Kg/m³, ó que una mol de aire pesa 29.

$$\text{Aire (C.N)} = 4,34 / 0,21 = 20,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del aire} = 20,6 \times 1,293 = 20,6 \cdot (29/22,4) = 26,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{Volumen de aire (C.N)} = 20,6 \text{ m}^3 \text{ (9-4)}$$

$$\text{Peso del aire} = 26,6 \text{ Kg. (9-4)}$$

EJERCICIO N° 10 (8)

Dada la reacción



PREGUNTAS

1. Cuantos gramos de cloruro sódico, reaccionaran con 50 gramos de sulfato sódico?

2. Cuantos gramos de cloruro bórico, se necesitan para precipitar 5,0 gramos de sulfato bórico?
3. Cuantos gramos de cloruro bórico, son equivalentes a 5,0 gramos de cloruro sodico?
4. Cuantos gramos de sulfato sodico se necesitan para la precipitacion del bario de 5,0 gramos de cloruro bórico?
5. Cuantos gramos de Na_2SO_4 han sido añadidos al BaCl_2 si han precipitado 5,0 gramos de BaSO_4 ?
6. Cuantas libras de Na_2SO_4 son equivalentes a 5 libras de NaCl ?
7. Cuantas libras de BaSO_4 se precipitan con 5,0 libras de cloruro bórico?
8. Cuantas libras de BaSO_4 se precipitan con 5,0 libras de Na_2SO_4 ?
9. Cuantas libras de BaSO_4 son equivalentes a 5,0 libras de NaCl ?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos

$$\text{Ba} = 137,36; \text{Cl} = 35,457; \text{Na} = 22,991; \text{S} = 32,006; \text{O} = 16$$

Pesos moleculares:

$$\text{BaCl}_2 = 208,274; \text{Na}_2\text{SO}_4 = 141,988$$

$$\text{NaCl} = 58,448; \text{BaSO}_4 = 233,366$$

Basandonos en la estequiometria de la reaccion, una mol de cloruro bórico reacciona con una mol de sulfato sodico, los 5 gramos de sulfato sodico con cuantos gramos de cloruro bórico reaccionarán. Esto se calcula así:

$$\text{BaCl}_2 = 5 \times (208,274 / 141,988) = 7,334 \text{ g.}$$

$$\text{BaCl}_2 = 7,334 \text{ g. (10-1)}$$

2.

Razonando del mismo modo anterior solo que en este caso los 5 gramos son de sulfato bórico.

$$\text{BaCl}_2 = 5 \times (208,274 / 233,366) = 4,462 \text{ g.}$$

$$\text{BaCl}_2 = 4,462 \text{ g. (10-2)}$$

3.

De nuevo recurrimos a la estequiometria de la reaccion, para determinar cuantos gramos de cloruro bórico, son equivalentes en esa reaccion a 5 de cloruro de Na.

$$\text{BaCl}_2 = 5 \times (208,274 / 2 \times 58,448) = 8,909 \text{ g.}$$

$$\text{BaCl}_2 = 8,909 \text{ g. (10-3)}$$

4.

En este caso, debemos calcular el Ba que contiene el BaCl_2 y luego determinar que cantidad de Na_2SO_4 lo podría precipitar:

$$\text{Ba en BaCl}_2 = 5 \times (137,36 / 208,274) = 3,2976 \text{ g.}$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 3,2976 \times (141,988 / 137,36) = 3,409 \text{ g.}$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 3,409 \text{ g. (10-4)}$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 5 \times (141,988 / 233,366) = 3,042 \text{ g.}$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 3,409 \text{ g. (10-5)}$$

6.

Este calculo es parecido al del punto (3) y procedemos de mismo modo

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 5 \times (141,988 / 2 \times 58,448) = 6,073 \text{ lbs.}$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 6,073 \text{ lbs. (10-6)}$$

7.

Este calculo es parecido al del punto (2) y procedemos de la misma manera

$$\text{BaSO}_4 = 5 \times (233,366 / 208,274) = 5,602 \text{ lbs.}$$

$$\text{BaSO}_4 = 5,602 \text{ lbs. (10-7)}$$

8.

Procedemos del mismo modo que en el punto anterior:

$$\text{BaSO}_4 = 5 \cdot (233,366/141,988) = 8,218 \text{ lbs.}$$

$$\text{BaSO}_4 = 8,218 \text{ lbs. (10-8)}$$

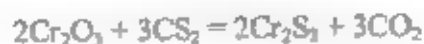
9

$$\text{BaSO}_4 = 5 \cdot (233,366/2 \times 58,448) = 9,982 \text{ lbs.}$$

$$\text{BaSO}_4 = 9,982 \text{ lbs. (10-9)}$$

EJERCICIO N° 11 (8)**PREGUNTAS**

1. Cuantos gramos de sulfuro crómico se formarán a partir de 0.928 gramos de óxido crómico, según la reacción:

**SOLUCION**

1.

Pesos atómicos:

$$\text{Cr}=52,01; \text{O}=16; \text{C}=12,011; \text{S}=32,006$$

Pesos moleculares:

$$\text{Cr}_2\text{O}_3 = 52,01 \times 2 + 3 \times 16 = 152,02$$

$$\text{Cr}_2\text{S}_3 = 52,01 \times 2 + 3 \times 32,006 = 200,038$$

Como se puede observar en la reacción, 2 moles de óxido crómico producen 2 moles de sulfuro crómico, la pregunta es, cuanto sulfuro crómico serán producidos mediante la reacción propuesta por 0,928 gramos del primero?

$$\text{Cr}_2\text{S}_3 = 0,928 \cdot (200,038 \times 2 / 152,02 \times 2) = 1,221 \text{ g.}$$

$$\text{Cr}_2\text{S}_3 \text{ formado} = 1,221 \text{ g. (11-1)}$$

EJERCICIO N° 12 (8)**PREGUNTAS**

1. Cuanto carbono se necesita para reducir 1,5 libras de trióxido de arsénico?

SOLUCION

1.

La reacción de reducción es la siguiente:



Pesos atómicos

$$\text{As}=74,91; \text{C}=12,011; \text{O}=16$$

Pesos moleculares

$$\text{As}_2\text{O}_3 = 74,91 \times 2 + 16 \times 3 = 197,82$$

$$\text{C} = 1,5 \cdot (3 \times 12,011 / 197,82) = 0,273 \text{ lbs.}$$

$$\text{C} = 0,273 \text{ lbs (12-1)}$$

EJERCICIO N° 13 (8)

El oxígeno se prepara según la reacción



PREGUNTAS

1. ¿Cuánto oxígeno se produce si se descomponen 9,12 gramos de clorato de potasio?
2. ¿Cuántos gramos de clorato de potasio deben descomponerse para liberar 2,5 gramos de oxígeno?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{K}=39,1; \text{Cl}=35,457; \text{O}=16$$

Pesos moleculares:

$$\text{KClO}_3 = 39,1 + 35,457 + 16 \times 3 = 122,557$$

$$\text{KCl} = 39,1 + 35,457 = 74,557$$

La estequiometría de la reacción nos dice que 2 moles de clorato de potasio, producen 3 de oxígeno, por tanto, los 9,12 gramos del primero, al descomponerse deben producir

$$\text{O} = 9,12 \cdot (3 \times 32 / 2 \times 122,557) = 3,572 \text{ g.}$$

$$\text{O producido} = 3,572 \text{ g (13-1)}$$

2.

Para producir 2,5 gramos de oxígeno, deben descomponerse

$$\text{KClO}_3 = 2,5 \cdot (2 \times 122,557 / 3 \times 32) = 6,383 \text{ g.}$$

$$\text{KClO}_3 \text{ descompuesto} = 6,383 \text{ g (13-2)}$$

EJERCICIO N° 14 (8)

El SO_2 puede producirse mediante la siguiente reacción:



PREGUNTAS

1. ¿Cuánto cobre debe emplearse, para obtener 32 libras de SO_2 ?
2. ¿Cuánto H_2SO_4 del 94% de pureza debe emplearse, para obtener 32 libras de SO_2 ?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{Cu}=63,54; \text{H}=1,008; \text{S}=32,006; \text{O}=16$$

Pesos moleculares:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 1,008 \times 2 + 32,006 + 16 \times 4 = 98,022$$

$$\text{CuSO}_4 = 63,54 + 32,006 + 16 \times 4 = 159,546$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,008 \times 2 + 16 = 18,016$$

$$\text{SO}_2 = 32,006 + 16 \times 2 = 64,006$$

De nuevo en base a la estequiometría de la reacción, 1 átomo de Cu produce una mol de SO_2 , por tanto, para obtener 32 libras de este gas se deben emplear de Cu:

$$\text{Cu} = 32 \cdot (63,54 / 64,006) = 31,767 \text{ lbs.}$$

$$\text{Cu a emplearse} = 31,767 \text{ lbs (14-1)}$$

2.

El H_2SO_4 calculado en base a la estequiometría de la reacción, es un compuesto puro, sin embargo, el que se encuentra en el mercado (que es el comercial) solo tiene el 94% de pureza, por lo tanto, debemos convertirlo de puro a comercial:

$$\text{H}_2\text{SO}_4(\text{de la reacción}) = 32 \cdot (2 \times 98,022 / 64,006) = 98,013 \text{ lbs}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4(\text{comercial}) = 98,013 / 0,94 = 104,27 \text{ lbs.}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4(\text{comercial}) = 104,27 \text{ lbs (14-2)}$$

EJERCICIO N° 15 (8)

El análisis de una piedra caliza es el siguiente:

CaCO ₃	94,52%
MgCO ₃	4,16%
Insolubles	1,32%

PREGUNTAS

1. Cuántas libras de CaO podrían obtenerse de 4 toneladas de piedra caliza?
2. Cuántas libras de CO₂ se desprenden por cada libra de piedra caliza?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{Ca}=40; \text{C}=12; \text{O}=16; \text{Mg}=24$$

Pesos moleculares:

$$\text{CaCO}_3 = 40 + 12 + 3 \times 16 = 100$$

$$\text{CaO} = 40 + 16 = 56$$

$$\text{MgCO}_3 = 24 + 12 + 48 = 84$$

$$\text{CO}_2 = 44$$

Vamos a suponer que se trata de 4 toneladas cortas de piedra caliza y 1 tonelada corta 2000 libras

El CaO de la pregunta, proviene de la descomposición del CaCO₃, en base a la reacción



$$\text{Piedra caliza} = 4 \times 2000 = 8000 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaCO}_3 = 8000 \times 0,9452 = 7561,6 \text{ lbs}$$

De acuerdo a (1):

$$\text{CaO} = 7561,6 \cdot (56/100) = 4234,5 \text{ Lbs.}$$

$$\text{CaO obtenido} = 4234,5 \text{ lbs (15-1)}$$

2

A más de la reacción (1), ocurre la siguiente reacción



Como se puede observar, el CO₂ se desprende de las reacciones (1) y (2), por tanto

$$\text{CO}_2(\text{total}) = \text{CO}_2(1) + \text{CO}_2(2).$$

Como se trata de 1 libra de piedra caliza CaCO₃ = 0,9452 lbs, y MgCO₃ = 0,0416 lbs

$$\text{CO}_2(\text{total}) = 0,9452 \cdot (44/100) + 0,0416 \cdot (44/84) = 0,438 \text{ lbs}$$

$$\text{CO}_2 \text{ desprendido} = 0,438 \text{ lbs/lb de piedra caliza (15-2)}$$

EJERCICIO N° 16 (8)

PREGUNTAS

1. Cuántas libras de sal común se necesitan para fabricar 2500 libras de torta de sal (Na_2SO_4)?
2. Cuántas libras de sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) producirán esta cantidad de torta de sal?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{Na}=23; \text{S}=32; \text{O}=16; \text{H}=1; \text{Cl}=35,5$$

Pesos moleculares:

$$\text{Sal común} = \text{NaCl} = 23+35,5 = 58,5$$

$$\text{Torta de sal} = \text{Na}_2\text{SO}_4 = 23 \times 2 + 32 + 16 \times 4 = 142$$

$$\text{Sal de Glauber} = \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = 322$$

Reacción para la producción de torta de sal.

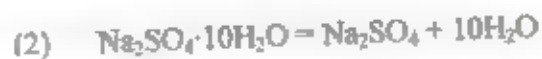


$$\text{NaCl} = 2500 \cdot (2 \times 58,5 / 142) = 2059,86 \text{ lbs}$$

$$\text{NaCl necesaria} = 2060 \text{ lbs (16-1)}$$

2.

La producción de la torta de sal, a partir de la sal de Glauber, se produce de acuerdo a la siguiente reacción:



$$\text{Sal de Glauber} = 2500 \cdot (322 / 142) = 5669 \text{ lbs}$$

$$\text{Sal de Glauber necesaria} = 5669 \text{ lbs (16-2)}$$

EJERCICIO N° 17 (8)

Un compuesto cuyo peso molecular es 103, presentó el siguiente análisis:

$$\text{C} = 81,5\%$$

$$\text{H} = 4,9\%$$

$$\text{N} = 13,6\%$$

PREGUNTAS

1. Cual es la fórmula del compuesto?

SOLUCION

1.

Pesos atómicos:

$$\text{C}=12; \text{H}=1; \text{N}=14$$

Lo primero que debemos hacer es calcular el # de átomos que posee cada elemento en el compuesto para lo cual por comodidad suponemos que el compuesto pesa 100 gramos, en cuyo caso por ejemplo contendría 81,5 gramos de C. Planteamos una regla de tres que diga si un átomo de C pesa 12 g ¿peso atómico? 81,5 gramos de C a cuantos átomos corresponderán?

$$\text{C} = 81,5 / 12 = 7,0917 \text{ átomos}$$

$$\text{H} = 4,9 / 1 = 4,9 \text{ átomos}$$

$$\text{N} = 13,6 / 14 = 0,8714 \text{ átomos}$$

Luego determinamos la proporción atómica, dividiendo en # de átomos de cada elemento por el menor de ellos, así.

$$C = 7,0917/0,9714 = 7,300 \approx 7$$

$$H = 4,9/0,9714 = 5,044 \approx 5$$

$$N = 0,9714/0,9714 = 1$$

La fórmula será: C_7H_5N (17-1)

Como prueba, recalculamos el peso molecular:

$$P.M. = 7 \times 12 + 5 + 14 = 103$$

EJERCICIO N° 18 (8)

Se desea comerciar con oxígeno en pequeños cilindros que contengan $0,5 \text{ ft}^3$ y que c/u contenga 1,0 libras de oxígeno.

Si los cilindros han de estar sometidos como máximo a una temperatura de 120°F .

PREGUNTAS

1. calcular la presión, en libras por pulgada cuadrada (psi), para la que deben estar proyectados; supuesta la aplicación de los gases ideales.

SOLUCION

1.

La Ley de los Gases Ideales se expresa de la manera siguiente:

$$PV = nRT \quad (2)$$

Donde,

P = presión

V = volumen

n = número de moles

T = temperatura absoluta

R = constante universal

Por comodidad, vamos a utilizar unidades familiares, de manera que R = lts atm/mol K, después haremos la conversión a la escala inglesa. Así:

$$1 \text{ ft}^3 = 28,316 \text{ lts} \therefore$$

$$V = 0,5 \text{ ft}^3 = 14,158 \text{ lts}$$

$$^\circ\text{C} = 5/9(^\circ\text{F} - 32) \quad (3)$$

$$\text{Temperatura en } ^\circ\text{C} = 5/9(120 - 32) = 48,9$$

$$T = 48,9 + 273 = 321,9\text{K}$$

Para calcular el # de moles, usamos:

$$n = W/M \quad (4)$$

donde

W = peso

M = peso molecular

$$1 \text{ libra} = 453,6 \text{ gramos} \therefore$$

$$W = 453,6 \text{ g}$$

$$n = 453,6/32 = 14,175 \text{ gramos-mol}$$

Utilizando (2)

$$P = nRT/V = 14,175 \times 0,082 \times 321,9/14,158 = 26,43 \text{ atm}$$

$$1 \text{ atm} = 14,70 \text{ psi} \therefore$$

$$P = 26,43 \times 14,7 = 388,52 \text{ psi}$$

$$\text{Presión de proyección del cilindro} = 388,52 \text{ psi (18-1)}$$

EJERCICIO N° 19 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular el número de pies cúbicos de sulfuro de hidrógeno, medidos a la temperatura de 50°C y a una presión de 29,5 pulgadas de mercurio, que pueden producirse de 7 libras de FeS.

SOLUCION

1. Pesos atómicos.

$$\text{Fe}=56; \text{S}=32, \text{H}=1$$

Pesos moleculares.

$$\text{FeS} = 56+32 = 88$$

1 mol de gas expresado en libras, ocupa 359 ft³ a C.N

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



De acuerdo a la estequiometría de la reacción la cantidad de H₂S producido a condiciones normales es:

$$\text{H}_2\text{S} = 7 \cdot (359/88) = 28,56 \text{ ft}^3$$

Este volumen debemos llevarlo a las condiciones dadas, de conformidad con la ecuación (1), tomando en cuenta que el estado (1) representa las condiciones normales, y el estado (2) las condiciones reales.

$$V_1 = 28,56 \text{ ft}^3, V_2 = ?$$

$$P_1 = 29,92 \text{ in-Hg}, P_2 = 29,5 \text{ in-Hg}$$

$$T_1 = 273\text{K}, T_2 = 50+273 = 323\text{K}$$

$$V_2 = 28,56 \cdot (29,92/29,5) \cdot (323/273) = 34,27$$

$$\text{H}_2\text{S producido} = 34,27 \text{ ft}^3 \text{ (19-1)}$$

EJERCICIO N° 20 (8)

El gas acetileno, se obtiene tratando el carburo de calcio con agua, según la siguiente reacción:



PREGUNTAS

1. Calcular el número de horas de servicio que se pueden conseguir con una libra de carburo en una lámpara de acetileno que quema 2 pies cúbicos de gas por hora a una temperatura de 75°F y 743 mm-Hg de presión.

SOLUCION

1. Pesos atómicos:

$$\text{Ca}=40; \text{C}=12; \text{O}=16, \text{H}=1$$

Pesos moleculares:

$$\text{CaC}_2 = 40+2 \times 12 = 64$$

$$\text{C}_2\text{H}_2 = 12 \times 2 + 2 = 26$$

Primero determinamos el acetileno producido por una libra de carburo a C.N

$$\text{C}_2\text{H}_2(\text{C.N}) = 1 \cdot (359/64) = 5,61 \text{ ft}^3$$

Este volumen lo llevamos a las condiciones reales por medio de (1)

$$V_1 = 5,61 \text{ ft}^3, V_2 = ?$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}, P_2 = 743 \text{ mm}$$

$$T_1 = 460+32 = 492^\circ\text{R}; T_2 = 460+75 = 535^\circ\text{R}$$

[Con la escala Fahrenheit (1.8), corresponde a 150.6°F de la escala Rankine que es una escala absoluta]

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$$

$$V_2 = 5,61 \cdot (761/492) \cdot (535/743) = 6,24 \text{ ft}^3$$

Dado que se queman 2 ft³/hr de acetileno, el # de horas será:

$$t = 6,24 \text{ ft}^3 + 2 \text{ ft}^3/\text{hr} = 3,12$$

$$\text{Tiempo de servicio} = 3,12 \text{ hr. (20-1)}$$

EJERCICIO N° 21 (8)

Una mezcla de gases contiene:

$$\text{HCl} = 0,274 \text{ lb-mol}$$

$$\text{N}_2 = 0,337 \text{ "}$$

$$\text{O}_2 = 0,089 \text{ "}$$

PREGUNTAS

Calcular: a 40 psi y 30°C:

1. El volumen ocupado por esta mezcla.
2. La densidad en lbs. ft³.

SOLUCION

1.

Pesos moleculares

$$\text{HCl} = 36,5$$

$$\text{N}_2 = 28$$

$$\text{O}_2 = 32$$

A C N, 1 lb-mol de gas ocupa 359 ft³, así el volumen de la mezcla de gas será

$$V(\text{C.N}) = (0,274 + 0,337 + 0,089) \times 359 = 251,3 \text{ ft}^3$$

Cambio de condiciones con ayuda de (1):

$$V_1 = 251,3 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ?$$

$$P_1 = 14,7 \text{ psi}; \quad P_2 = 40 \text{ psi}$$

$$T_1 = 273\text{K}; \quad T_2 = 273 + 30 = 303\text{K}$$

$$V_2 = 251,3 \times 14,7 \times 303 / 273 \times 40 = 102,5$$

$$\text{Volumen ocupado por la mezcla a condiciones dadas} = 102,5 \text{ ft}^3 \text{ (21-1)}$$

2

Para determinar la densidad, con ayuda de (4) debemos calcular el peso de cada uno de los gases que forman la mezcla, encontrar el peso total de la mezcla y dividirlo por el volumen total.

$$\text{Peso de HCl} = 0,274 \times 36,5 = 10,001 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso de N}_2 = 0,337 \times 28 = 9,436 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso de O}_2 = 0,089 \times 32 = 2,848 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso total de la mezcla} = 22,285 \text{ Lbs}$$

$$\text{Densidad del gas} = 22,285 / 102,5 = 0,2174 \text{ lbs/ft}^3$$

$$\text{Densidad de la mezcla gaseosa} = 0,2174 \text{ lbs/ft}^3 \text{ (21-2)}$$

EJERCICIO N° 22 (8)

Un gas de chimenea tiene la siguiente composición, en volumen:

$$\text{CO}_2 = 9,5\%$$

$$\text{CO} = 0,2\%$$

$$\text{O}_2 = 9,6\%$$

$$\text{N}_2 = 80,7\%$$

PREGUNTAS

Utilizando la ecuación de los gases ideales, calcular

1. La composición del gas, en peso.
2. El volumen ocupado por una libra de gas a 80°F y 29,5 in.Hg de presión.
3. Densidad del gas en lbs./ft³, en las condiciones del punto (2)
4. Peso específico relativo de la mezcla.

SOLUCION

1.

Pesos moleculares:

$$\text{CO}_2 = 44$$

$$\text{CO} = 28$$

$$\text{O}_2 = 32$$

$$\text{N}_2 = 28$$

Asumiendo un volumen cualquiera, debemos calcular el peso de c/u de las especies que componen el gas de chimenea; recordando que en C.N., el volumen de una mol de gas expresada en libras, ocupa 359 ft³.

Asumimos 100 ft³ de gas.

Cálculo de los volúmenes de las especies:

$$\text{CO}_2 = 100 \times 0,095 = 9,5 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO} = 100 \times 0,002 = 0,2 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 = 100 \times 0,096 = 9,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 = 100 \times 0,807 = 80,7 \text{ ft}^3$$

Cálculo de los pesos de las especies

$$\text{CO}_2 = 9,5 \times 44 / 359 = 1,1634 \text{ lbs} = 13,98\%$$

$$\text{CO} = 0,2 \times 28 / 359 = 0,0156 \text{ lbs} = 0,19\%$$

$$\text{O}_2 = 9,6 \times 32 / 359 = 0,8557 \text{ lbs} = 10,27\%$$

$$\text{N}_2 = 80,7 \times 28 / 359 = 6,2942 \text{ lbs} = 75,56\%$$

$$\text{Peso total del gas} = 8,3298 \text{ lbs}$$

Composición del gas en peso:

$$\text{CO}_2 = 13,98\%$$

$$\text{CO} = 0,19\%$$

$$\text{O}_2 = 10,27\%$$

$$\text{N}_2 = 75,56\%$$

$$100,00\% (22-1)$$

2.

Asumimos 1 libra de gas, a C.N., y calculamos en volumen que ocupa cada especie, con la condición de que la sumatoria es el volumen total del gas.

Volumen ocupado por el

$$\text{CO}_2 = 1 \times 0,1398 \cdot (359/44) = 1,1406 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO} = 1 \times 0,0019 \cdot (359/28) = 0,0244 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 = 1 \times 0,1027 \cdot (359/32) = 1,1522 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 = 1 \times 0,7556 \cdot (359/28) = 9,6879 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen gas (C.N)} = 12,0051 \text{ ft}^3$$

Cambio de condiciones.

$$V_1 = 12,0051 \text{ ft}^3, \quad V_2 = ?$$

$$P_1 = 29,92 \text{ in.Hg}; \quad P_2 = 29,5 \text{ in.Hg}$$

$$T_1 = 460 + 32 = 492^\circ\text{R}; \quad T_2 = 460 + 80 = 540^\circ\text{R}$$

$$V_2 = 12,0051 \cdot (29,92/29,5) \cdot (492/540) = 13,364 \text{ ft}^3$$

$$V_2(\text{condiciones dadas}) = 13,364 \text{ ft}^3 (22-2)$$

3

Densidad = peso/volumen

$$\text{Densidad} = 1/13,364 = 0,0748$$

$$\text{Densidad} = 0,0748 \text{ lbs/ft}^3 (22-3)$$

4

El peso específico relativo de un gas, es la relación de su densidad a la del aire, a las mismas condiciones de temperatura y presión.

A condiciones normales, 1 ft³ de aire peso 0,0867 lbs.

Calculamos 1 ft³ de aire a las condiciones dadas:

$$V_2(\text{aire}) = 1 \cdot (29,92/492) \cdot (540/29,5) = 1,1132 \text{ ft}^3$$

Densidad del aire a condiciones dadas = $0,0867/1,1132 = 0,0775 \text{ lbs/ft}^3$

$$\text{Peso específico relativo} = 0,0748/0,0775 = 1,0318$$

$$\text{Peso específico relativo} = 1,0318 \quad (22-4)$$

EJERCICIO N° 23 (8)

Por electrolisis de una disolución de salmuera se obtiene en el cátodo una mezcla de gases, que tiene la siguiente composición: en peso.

$$\text{Cl}_2 = 67\%$$

$$\text{Br}_2 = 28\%$$

$$\text{O}_2 = 5\%$$

PREGUNTAS

Utilizando la ecuación de los gases ideales, calcular:

1. La composición del gas en volumen
2. La densidad de la mezcla, gramos litro, a 25°C y 740 mm.Hg de presión
3. El peso específico relativo de la mezcla.

SOLUCION

1

Pesos moleculares

$$\text{Cl}_2 = 71$$

$$\text{Br}_2 = 160$$

$$\text{O}_2 = 32$$

Dado que la composición inicial viene dada en peso, para transformarla a volumen, debemos asumir un peso cualquiera para el gas total repartir ese peso en cu de las especies en base a la composición, y recordando que la mol de gas (g-mol) ocupa 22,4 litros, encontrar en volumen de cada especie y de allí la composición.

Asumimos 10 g. de gas y calculamos el peso de:

$$\text{Cl}_2 = 10 \times 0,67 = 6,7 \text{ g.}$$

$$\text{Br}_2 = 10 \times 0,28 = 2,8$$

$$\text{O}_2 = 10 \times 0,05 = 0,5$$

Calculamos los volúmenes de

$$\text{Cl}_2 = 6,7 (22,4/71) = 2,1138 \text{ lts} = 74,02\%$$

$$\text{Br}_2 = 2,8 (22,4/160) = 0,3920 \text{ lts} = 13,73$$

$$\text{O}_2 = 0,5 (22,4/32) = 0,3500 \text{ lts} = 12,25$$

$$\text{Total gas} = 2,8558 \text{ lts} = 100,00$$

Composición del gas en volumen.

$$\text{Cl}_2 = 74,02\%$$

$$\text{Br}_2 = 13,73\%$$

$$\text{O}_2 = 12,25\%$$

$$100,00\% \quad (23-1)$$

2

Como la densidad se pide calcularla a las condiciones dadas es necesario que el volumen recientemente calculado se lleve a esas condiciones y como ya conocemos el peso de cual proviene podemos calcular la densidad.

Veamos:

$$\begin{array}{ll} V_1 = 2,8558 \text{ lts.} & V_2 = ? \\ P_1 = 760 \text{ mm} & P_2 = 740 \text{ mm} \\ T_1 = 2273\text{K} & T_2 = 25+273 = 298\text{K} \end{array}$$

De acuerdo a la ley de los gases ideales:

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) \\ V_2 &= 2,8558 \cdot (760/273) \cdot (298/740) = 3,2016 \text{ lts} \end{aligned}$$

Densidad = peso/volumen

$$\begin{aligned} \text{Densidad} &= 10/3,2016 = 3,123 \text{ g/lts} \\ \text{Densidad} &= 3,123 \text{ g/lts (23-2)} \end{aligned}$$

3.

El volumen de una mol de aire a condiciones dadas será:

$$V_1 = 22,4 \cdot (760/740) \cdot (298/273) = 25,1121 \text{ lts/mol}$$

Una mol de aire pesa 29 g/mol

$$\text{Densidad del aire a condiciones dadas} = 29/25,1121 = 1,1548 \text{ g/lts.}$$

Peso específico relativo de gas = densidad del gas/densidad del aire

$$\begin{aligned} \text{Peso específico relativo del gas} &= 3,123 / 1,1548 = 2,704 \\ \text{Peso específico relativo del gas} &= 2,704 \text{ (23-3)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N° 24 (8)

PREGUNTAS

1. Una disolución tiene una densidad de 100 grados Twaddell. Calcular su peso específico relativo y su densidad en grados Baumé.
2. Un aceite tiene un peso específico relativo a 60° 60°F de 0,790. Calcular su densidad en grados API y en grados baumé.

SOLUCION

1.

La escala Twaddell expresa,

$$^{\circ}\text{T} = 200(\text{G}-1,0) \quad (5)$$

Donde:

$^{\circ}\text{T}$ = grados Twaddell

G = peso específico relativo

Así

$$\begin{aligned} \text{G} &= ^{\circ}\text{T}/200 + 1,0 \\ \text{G} &= (100/200) + 1 = 1,5 \\ \text{G} &= 1,5 \text{ (24-1)} \end{aligned}$$

La escala Baumé expresa,

$$^{\circ}\text{Bé} = (140/\text{G}) - 130 \quad (6)$$

$$^{\circ}\text{Bé} = 145 - (145/\text{G}) \quad (7)$$

Donde:

$^{\circ}\text{Bé}$ = densidad en grados Baumé

La expresión (6) se utiliza para líquidos más livianos que el agua y la (7) para los que son más pesados. En este caso, utilizamos la (7):

$$\begin{aligned} ^{\circ}\text{Bé} &= 145 - (145/1,5) = 48,33 \\ ^{\circ}\text{Bé} &= 48,33 \text{ (24-1)} \end{aligned}$$

$$\text{API} = (141,5/\text{G}) - 131,5 \quad (8)$$

Donde

API = grados API

$$\begin{aligned} \text{API} &= (141,5/0,79) - 131,5 = 47,61^{\circ} \\ \text{API} &= 47,61^{\circ} \text{ (24-2)} \end{aligned}$$

Utilizando (6):

$$^{\circ}\text{Bé} = (149/0,79) - 130 = 47,22$$

$$^{\circ}\text{Bé} = 47,22 \text{ (24-2)}$$

EJERCICIO N° 25 (8)

Una mezcla de amoníaco y aire a la presión de 730 mm.Hg y temperatura de 30°C, contiene 30% de NH_3 en volumen.

El gas pasa a una velocidad de 100 ft³/min a través de una torre de absorción, en la que solo se extrae NH_3 .

Los gases salen de la torre a una presión de 725 mm.Hg, una temperatura de 20°C y contienen 0,05% NH_3 en volumen.

PREGUNTAS

1. Calcular la velocidad de flujo del gas que sale de la torre, en ft³/min.
2. Calcular el peso de NH_3 absorbido en la torre por minuto.

SOLUCION

1.

Velocidad de flujo al entrar = 100 ft³/min (30°C, 730 mm)

$$\text{Entrada de } \text{NH}_3 = 100 \times 0,3 = 30 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\text{Entrada de aire} = 100 - 30 = 70 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\text{Salida de aire} = 100 - 0,05 = 99,95\%$$

$$\text{Salida de gas} = 70/0,995 = 70,035 \text{ ft}^3/\text{min (30°C, 730 mm)}$$

Dado que la salida real del gas es a 20°C y 725 mm Hg: con la ayuda de la ley de los gases ideales, debemos hacer el consiguiente cambio de estado:

$$V_1 = 70,035 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 = 730 \text{ mm.Hg}$$

$$P_2 = 725 \text{ mm.Hg}$$

$$T_1 = 30 + 273 = 303\text{K}$$

$$T_2 = 20 + 273 = 293\text{K}$$

Durante el cambio de condiciones del gas ideal, se cumple:

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2)$$

$$V_2 = 70,035 \cdot (730/303) \cdot (293/725) = 68,19$$

$$\text{Velocidad de flujo del gas al salir} = 68,19 \text{ ft}^3/\text{min (25-1)}$$

2.

$$\text{NH}_3 \text{ que sale de la torre} = 70,035 - 70 = 0,035 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\text{NH}_3 \text{ absorbido} = 30 - 0,035 = 29,965 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\text{Peso molecular del } \text{NH}_3 = 14 + 3 = 17..$$

$$\text{NH}_3 \text{ absorbido} = 29,965 \cdot (17/359) = 1,419 \text{ lbs/min}$$

$$\text{NH}_3 \text{ absorbido} = 1,419 \text{ lbs/min (25-2)}$$

EJERCICIO N° 26 (8)

Un volumen de 1000 ft³ de aire húmedo, a una presión total de 740 mm.Hg y temperatura de 30°C, contiene vapor de agua en tales proporciones que su presión parcial es de 22 mm.Hg.

Si, sin cambiar la presión total, la temperatura se reduce a 15°C y parte del vapor de agua se separa por condensación.

Después de enfriarlo se encuentra que la presión parcial del vapor de agua es 12,7 mm.Hg.

PREGUNTAS

1. Calcular el volumen del gas después del enfriamiento.
2. Calcular el peso del agua condensada.

SOLUCION

1.

En este caso, se está expresando la composición de una mezcla gaseosa en función de las presiones parciales de los componentes.

La adición o extracción de un componente de una mezcla, produce un cambio en la presión parcial de todos los otros componentes.

El volumen real ocupado por cada uno de los componentes será siempre el mismo que el de toda la mezcla, pues en esto se fundamenta la ley de las presiones parciales de Dalton.

El volumen de la mezcla puede determinarse siempre por aplicación de la ley de los gases a cualquier componente que pasa por el proceso sin cambio en su cantidad, y cuya presión parcial se conoce en las condiciones inicial y final, veamos:

Base = 1000 ft³ de aire húmedo (740 mm, 30°C)

Presión inicial (aire seco) = 740 - 22 = 718 mm

Presión final (aire seco) = 740 - 12,7 = 727,3 mm

Volumen real inicial (aire seco) = 1000 ft³ volumen de la mezcla

El volumen final de la mezcla al cambiar las condiciones, puede calcularse aplicando la ley de los gases ideales, solo al aire seco, así:

$V_1 = 1000 \text{ ft}^3$

$V_2 = ?$

$P_1 = 718 \text{ mm}$

$P_2 = 727,3 \text{ mm}$

$T_1 = 303 \text{ K}$

$T_2 = 288 \text{ K}$

$V_2 = 1000 \cdot (718/303) \cdot (288/727,3) = 938,3 \text{ ft}^3$

Volumen de la mezcla después del enfriamiento = 938,3 ft³ (26-1)

2

Para determinar el peso del agua condensada, debemos llevar a condiciones normales tanto el volumen inicial como el final del agua.

Los volúmenes inicial y final del agua son respectivamente los mismos de la mezcla, por lo tanto:

$V_1 = 1000 \text{ ft}^3$

$V_2 = ?$

$P_1 = 22 \text{ mm}$

$P_2 = 760 \text{ mm}$

$T_1 = 303 \text{ K}$

$T_2 = 273 \text{ K}$

$V_2(\text{C.N.}) = 1000 \cdot (22/303) \cdot (273/760) = 26,081 \text{ ft}^3$

Para el volumen final de agua:

$V_1 = 938,3 \text{ ft}^3$

$V_2 = ?$

$P_1 = 12,7 \text{ mm}$

$P_2 = 760 \text{ mm}$

$T_1 = 288 \text{ K}$

$T_2 = 273 \text{ K}$

$V_2(\text{C.N.}) = 938,3 \cdot (12,7/288) \cdot (273/760) = 14,863 \text{ ft}^3$

Agua condensada (C.N.) = 26,081 - 14,863 = 11,218 ft³

$\text{H}_2\text{O} (\text{condensada}) = 11,218 \cdot (18/359) = 0,562 \text{ lbs}$

Peso de agua condensada = 0,562 lbs (26-2)

EJERCICIO N° 27 (8)

En la producción de carbón activado empleado para la absorción, se destilan cáscaras de coco y se tratan con vapor precalentado.

Los gases que resultan del proceso salen mezclados con el vapor de agua.

En una planta que emplea este proceso, el gas producido es 100000 ft³/hr a 850°F y 15 ps. de presión absoluta, y presenta el siguiente análisis volumétrico:

$\text{N}_2 = 10,0\%$ $\text{H}_2 = 20,0\%$

$\text{CO}_2 = 5,0\%$ $\text{CO} = 25,0\%$

$\text{H}_2\text{O} = 15,0\%$ $\text{NH}_3 = 20,0\%$ $\text{C}_2\text{H}_4 = 5,0\%$

Antes de la absorción de NH_3 en H_2SO_4 , los gases se enfrían a 150°F en un caminador de calor. El resultado de esto es la separación de 90% del agua por condensación.

El NH_3 absorbido por el agua es despreciable.

La absorción del NH_3 y la extracción de casi todo el vapor de agua residual, va acompañada por un posterior enfriamiento y absorción de la disolución de ácido sulfúrico.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso molecular promedio de la mezcla gaseosa original (incluyendo el vapor de agua).
2. El volumen específico de los gases que salen del proceso a 850°F y 15 psi, expresado en ft³/lb
3. El peso de los gases (incluyendo el vapor de agua) que se en el proceso, expresado en libras por hora.
4. El peso del agua condensada en el cambiador de calor, en libras por hora.
5. El volumen de los gases (incluyendo el vapor de agua), que salen del cambiador de calor a 150°F y 15 psi, expresado en ft³/hr
6. El peso de (NH₄)₂SO₄ producido, en libras por hora.
7. El análisis volumétrico de los gases que salen después de la absorción por H₂SO₄

SOLUCION

1.

El peso molecular medio de una mezcla de gases se calcula asumiendo un mol de la mezcla, como base de calculo. Se calcula entonces el peso de esta cantidad molar (lb), y esto representa el peso molecular medio.

Hay que recordar la ecuacion (4) que sirve para relacionar el peso (W), el peso molecular (M) y el numero de moles (n).

Pesos moleculares

$$N_2=28; CO_2=44; H_2O=18; H_2=2; CO=28; NH_3=17; C_2H_4=28$$

$$n = W/M \quad (4)$$

Asumimos 1 lb-mol de gas:

De acuerdo a la composicion al N₂ le correspondiera 1x0.1=0.1 lb-mol su peso molecular es 28, por tanto, aplicando (4), $W = 28 \times 0.1 = 2.8$ lb. De esta manera vamos a calcular el peso de cada componente de la mezcla y la sumatoria de esos pesos sera en peso molecular promedio

$$N_2 = 0.10 \text{ lb-mol} = 2.8 \text{ lbs}$$

$$CO_2 = 0.05 \text{ lb-mol} = 2.2 \text{ lbs}$$

$$H_2O = 0.15 \text{ lb-mol} = 2.7 \text{ lbs}$$

$$H_2 = 0.20 \text{ lb-mol} = 0.4 \text{ lbs}$$

$$CO = 0.25 \text{ lb-mol} = 7.0 \text{ lbs}$$

$$NH_3 = 0.20 \text{ lb-mol} = 3.4 \text{ lbs}$$

$$C_2H_4 = 0.05 \text{ lb-mol} = 1.4 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso de 1 lb-mol} = 19.9 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso molecular medio del gas} = 19.9 \quad (27-1)$$

2.

En C. N., el peso molecular medio expresado en libra, ocupa 359 ft³. Veamos estos 359 ft³ que volumen representan a las condiciones de salida del gas, para lo cual utilizaremos la ley de los gases ideales.

$$V_1 = 359 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 = 14.70 \text{ psi}$$

$$P_2 = 15 \text{ psi}$$

$$T_1 = 492^\circ R$$

$$T_2 = 460 + 850 = 1310^\circ R$$

$$V_2 = 359 (14.7/15) (1310/492) = 936.76 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen específico} = 936.76/19.9 = 47.07 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

$$\text{Volumen específico del gas al salir} = 47.07 \text{ ft}^3/\text{lb} \quad (27-2)$$

3

Levamos el gas producido a C.N

$$V(C.N) = 100000 (15/1310) (492/14.7) = 38323.73 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2O \text{ en este} = 38323.73 \times 0.15 = 5748.6 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2O \text{ condensada} = 5748.6 \times 0.9 = 5173.7 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 38323.73 (\text{ft}^3/\text{hr}) \times 19.9 \text{ lb}/359 \text{ ft}^3 = 2124.4 \text{ lb/hr}$$

$$\text{Peso } H_2O \text{ condensada} = 5173.7 (18/359) = 259.4 \text{ lb/hr}$$

$$\text{Gases que salen} = 2124.4 - 259.4 = 1865 \text{ lb/hr}$$

$$\text{Peso del gas al salir} = 1865 \text{ lb/hr} \quad (27-3)$$

4

Agua condensada = 259,4 lb/hr (ya determinado)
 Peso agua condensada = 259,4 lb/hr (27-4)

5.

Aplicamos la ley de los gases ideales:

$$\begin{aligned} V_1 &= 38323,73 \text{ ft}^3/\text{hr} & V_2 &=? \\ P_1 &= 14,7 \text{ psi} & P_2 &= 15 \text{ psi} \\ T_1 &= 32+460 = 492^\circ\text{R} & T_2 &= 150+460 = 610^\circ\text{R} \\ V_2 &= 38323,73 \cdot (14,7/15) \cdot (610/492) = 46564,9 \end{aligned}$$

Volumen gases con agua remanente = 46565 ft³/hr (27-5)

6.

La reacción que produce el (NH₄)₂SO₄, se escribe así:



Pesos moleculares:

$$\begin{aligned} \text{NH}_3 &= 17 \\ (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 &= 132 \\ \text{Volumen NH}_3(\text{C.N}) &= 38323,73 \times 0,20 = 7664,75 \text{ ft}^3/\text{hr} \\ \text{Peso NH}_3 &= 7664,75 \cdot (17/359) = 363 \text{ lb/hr} \\ (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 &= 363 \cdot (132/2 \times 17) = 1409,3 \text{ lb/hr} \\ (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \text{ producido} &= 1409,3 \text{ lb/hr (27-6)} \end{aligned}$$

7

Si eliminamos de los gases en NH₃ y el H₂O al final del proceso, la composición (en vol. men) del gas al salir será:

$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= 100000 \times 0,10 = 10000 \text{ ft}^3/\text{hr} = 15,39\% \\ \text{CO}_2 &= 100000 \times 0,05 = 5000 \text{ " " " " } = 7,69\% \\ \text{H}_2 &= 100000 \times 0,20 = 20000 \text{ " " " " } = 30,77\% \\ \text{CO} &= 100000 \times 0,25 = 25000 \text{ " " " " } = 38,46\% \\ \text{C}_2\text{H}_4 &= 100000 \times 0,05 = 5000 \text{ " " " " } = 7,69\% \\ &65000 \text{ ft}^3/\text{hr} & 100,0 \text{ (27-7)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N° 28 (9)

El análisis Orsat de un gas da los siguientes porcentajes en volumen

$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= 75\% \\ \text{CO}_2 &= 15\% \\ \text{O}_2 &= 10\% \end{aligned}$$

El punto de rocío del gas es 30°C, medido cuando la presión total del gas es de 745

mm Hg

PREGUNTAS

1. El análisis completo del gas, los porcentajes en volumen sobre una base de en húmedo.
2. El análisis completo del gas, en porcentaje en peso sobre una base de en húmedo.
3. La densidad del gas a C.N, en lb/ft³.
4. La densidad del gas a 500°F y 745 mm de presión.

SOLUCION

1

El aparato Orsat siempre está saturado con vapor de agua (9)

La presión de agua en el punto de rocío (30°C) = 31,82 mm (tablas).

Supongamos 100 cm³ de aire seco

P(aire seco) = 745-31,82

$$V(\text{agua}) = \{(31,82) + (745 - 31,82)\} \times 100 = 4,46 \text{ cm}^3$$

La composición del gas húmedo será.

$$\begin{array}{rcl} \text{N}_2 & = 100 \times 0,75 & = 75,0 \text{ cm}^3 = 71,80\% \\ \text{CO}_2 & = 100 \times 0,15 & = 15,0 \text{ cm}^3 = 14,36\% \\ \text{O}_2 & = 100 \times 0,10 & = 10,0 \text{ cm}^3 = 9,57\% \\ \text{H}_2\text{O} & = & 4,46 \text{ cm}^3 = 4,27\% \\ & & \hline & & 104,46 \quad 100,0 (28-1) \end{array}$$

2.

Dado que ya tenemos la composición del gas en volumen sabiendo que a C.N una mol de cualquier gas expresada en gramos ocupa 22,4 litros podemos entonces calcular los pesos de los componentes y su composición en peso.

Supongamos 100 lts de gas a C.N

Los respectivos pesos y la composición serán los siguientes,

$$\begin{array}{rcl} \text{N}_2 & = 100 \times 0,7180 \times (28/22,4) & = 89,75 \text{ g} = 66,45\% \\ \text{CO}_2 & = 100 \times 0,1436 \times (44/22,4) & = 28,21 \text{ g} = 20,89\% \\ \text{O}_2 & = 100 \times 0,0957 \times (32/22,4) & = 13,67 \text{ g} = 10,12\% \\ \text{H}_2\text{O} & = 100 \times 0,0427 \times (18/22,4) & = 3,43 \text{ g} = 2,54\% \\ & & \hline & & 135,06 \text{ g} \quad 100,0\% (28-2) \end{array}$$

3

Supongamos 1 ft³ de gas húmedo. El peso de c/u de los componentes será:

$$\begin{array}{rcl} \text{N}_2 & = 0,7180 \times (28/359) & = 0,0560 \text{ lb} \\ \text{CO}_2 & = 0,1436 \times (44/359) & = 0,0716 \\ \text{O}_2 & = 0,0957 \times (32/359) & = 0,0085 \\ \text{H}_2\text{O} & = 0,0427 \times (18/359) & = 0,0021 \text{ lb} \\ \text{Peso de 1 ft}^3 \text{ de gas} & & 0,1382 \text{ lb} \\ \text{Densidad del gas} & = 0,1382 \text{ lb/1 ft}^3 & = 0,1382 \text{ lb/ft}^3 \\ & & \text{Densidad del gas} = 0,1382 \text{ lb/ft}^3 (28-3) \end{array}$$

4

Recordemos que $^{\circ}\text{C} = 5/9(^{\circ}\text{F} - 32)$ $\therefore 500^{\circ}\text{F} = 260^{\circ}\text{C}$

Vamos a trabajar con un volumen conocido que es el de una mol de gas 359 ft³ a C.N y vamos a llevar este volumen a las condiciones reales:

$$\begin{array}{rcl} T_1 & = 273 \text{ K} & T_2 = 260 + 273 = 533 \text{ K} \\ P_1 & = 760 \text{ mm} & P_2 = 745 \text{ mm} \\ V_1 & = 359 \text{ ft}^3 & V_2 = ? \end{array}$$

$$V_2 = 359 \times (760/273) \times (533/745) = 715 \text{ ft}^3$$

Este es el volumen ocupado por una mol de gas a condiciones reales. La composición volumétrica no cambia.

Assumamos 1 ft³ de gas a condiciones reales y a través de sus componentes, calculamos cuanto pesa

$$\begin{array}{rcl} \text{N}_2 & = 0,7180 \times (28/715) & = 0,0281 \text{ lb} \\ \text{CO}_2 & = 0,1436 \times (44/715) & = 0,0088 \\ \text{O}_2 & = 0,0957 \times (32/715) & = 0,0043 \\ \text{H}_2\text{O} & = 0,0427 \times (18/715) & = 0,0011 \\ \text{Peso de 1 ft}^3 \text{ real} & & 0,0423 \text{ lb} \\ \text{Densidad del gas} & = 0,0423 \text{ lb/1 ft}^3 & = 0,0423 \text{ lb/ft}^3 \\ & & \text{Densidad del gas a condiciones dadas} = 0,0423 \text{ lb/ft}^3 (28-4) \end{array}$$

EJERCICIO N° 29 (8)

Un subproducto de un horno de coque proporciona un máximo de 200 lb de gas de hulla por hora, que tiene la siguiente composición, en volumen

$C_6H_6 = 5,0\%$ $CO = 7,0\%$ $N_2 = 3,0\%$
 $C_2H_6 = 5,0\%$ $H_2 = 35,0\%$
 $CH_4 = 40,0\%$ $CO_2 = 5,0\%$

El gas sale del horno a 20,0 psi de presión absoluta y 740°F.

Después de enfriarse a 100°F, el benceno y el tolueno se separan completamente por

absorción

PREGUNTAS

absorción.

1. Calcular el peso molecular medio del gas que sale del horno y del recipiente de absorción.
2. El peso del gas que sale del horno y del recipiente de absorción.
3. La composición volumétrica del gas que sale del recipiente de absorción
4. Los pesos del benceno y del tolueno absorbidos,

SOLUCION

1.

Pesos moleculares:

$C_6H_6 = 78$ $C_7H_8 = 91$ $CH_4 = 16$
 $CO = 28$ $H_2 = 2$ $CO_2 = 44$ $N_2 = 28$

Tomemos como base 1 lb-mol de gas y vemos cuanto pesa y ese será su peso molecular. Si distribuimos esta lb-mol entre los componentes y multiplicamos por el peso molecular de cada uno de ellos, encontraremos el peso con que este componente contribuye al peso molecular de la mezcla por ejemplo al C_6H_6 le corresponden $1 \times 0,05 = 0,05$ lb-mol, si multiplicamos esto por su peso molecular nos dará 3,9 lb y con este valor contribuye este compuesto al peso molecular total

$C_6H_6 = 0,05 \times 78 = 3,9 \text{ lb}$
 $C_7H_8 = 0,05 \times 91 = 4,6 "$
 $CH_4 = 0,40 \times 16 = 6,4 "$
 $CO = 0,07 \times 28 = 1,96$
 $H_2 = 0,35 \times 2 = 0,7 "$
 $CO_2 = 0,05 \times 44 = 2,2 "$
 $N_2 = 0,03 \times 28 = 0,84 "$
20,60 lb

Peso molecular medio = 20,60 (29-1)

Al salir del recipiente de absorción se separan del gas el benceno y el tolueno. El nuevo gas

será

$CH_4 = 40 = 44,44\%$
 $CO = 7 = 7,78$
 $H_2 = 35 = 38,89$
 $CO_2 = 5 = 5,56$
 $N_2 = \frac{3}{90} = 3,33\%$
90 = 100,0%

Una libra-mol de este nuevo gas, pesará.

$CH_4 = 0,4444 \times 16 = 7,1104 \text{ lb}$
 $CO = 0,0778 \times 28 = 2,1784$
 $H_2 = 0,3889 \times 2 = 0,7778$
 $CO_2 = 0,0556 \times 44 = 2,4464$
 $N_2 = 0,0333 \times 28 = 0,9324 \text{ lb}$
13,4454 lb

El peso molecular medio = 13,4454 (29-1)

2

Trasladamos el gas de las condiciones dadas a las condiciones normales

$V_1 = 1'000'000 \text{ ft}^3$ $V_2 = ?$
 $P_1 = 20 \text{ psi}$ $P_2 = 14,7 \text{ psi}$
 $T_1 = 460 + 740 = 1200^\circ R$ $T_2 = 492^\circ R$
 $V_2(CN) = 1'000'000(20/14,7) \cdot (492/1200) = 557823 \text{ ft}^3$

Después de pesarse el gas promedio ya fue determinado = 20,6

Peso de este gas = 557823 x (20,6/359) = 32009 lb/hr.

El gas que sale del horno pesa = 32009 lb/hr (29-2)

El gas que sale del recipiente de absorción es $1'000'000 \times 0,9 = 900000 \text{ ft}^3/\text{hr}$

$$V_{(C.N)} = 900000 \times (20/14,7) \times (492/1200) = 502041 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$\text{Peso de este gas} = 502041 \times (13,4454/359) = 18802,6$$

Gas que sale del recipiente de absorción = 18802,6 lb/hr (29-2)

3.

Esta composición ya fue calculada en el punto (1.) como:

$$\text{CH}_4 = 44,44\%$$

$$\text{CO} = 7,78\%$$

$$\text{H}_2 = 38,89\% \text{ (29-3)}$$

$$\text{CO}_2 = 5,56\%$$

$$\text{N}_2 = 3,33\%$$

4

$$\text{Benceno absorbido} = 1'000'000 \times 0,05 = 50000 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$\text{Tolueno} = 1'000'000 \times 0,05 = 50000 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

Llevamos estos gases a condiciones normales.

$$\text{C}_7\text{H}_8 = \text{C}_6\text{H}_6 = 50000 \times (20/14,7) \times (492/1200) = 27891 \text{ ft}^3/\text{hr (C.N)}$$

Pesos

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 27891 \times (78/359) = 6060$$

$$\text{C}_7\text{H}_8 = 27891 \times (92/359) = 7147,6$$

Pesos

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 6060 \text{ lb/hr (29-4)}$$

$$\text{C}_7\text{H}_8 = 7147,6 \text{ lb/hr (29-4)}$$

EJERCICIO N° 30 (8)

El gas que sale de un estabilizador de gasolina, tiene la siguiente composición en volumen:

$$\text{C}_3\text{H}_8 = 8,0\%$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 78,0$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 10,0$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} = 4,0$$

Este gas sale a 90°F y 16 ps. de presión absoluta, se suministra a la velocidad de 70000 ft³/hr a una planta de conversión de gas donde tienen lugar las siguientes reacciones:



Los gases $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ se convierten en un 95% y el 90% del CO resultante también reacciona según las reacciones anteriores.

PREGUNTAS

1. Calcular el peso molecular medio del gas que sale del estabilizador.
2. Calcular el peso del gas suministrado a la planta de conversión, en libras por hora.
3. Calcular el peso del hidrógeno que sale de la planta convertidora, en libras/hora.

SOLUCION

1

Asumimos 1 lb-mol de gas y determinamos cuanto pesa esta y ese será el peso molecular medio del gas.

$$\text{C}_3\text{H}_8 = 0,08 \times 44 = 3,52 \text{ lb}$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 0,78 \times 16 = 12,48 \text{ lb}$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,10 \times 30 = 3,0 \text{ lb}$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,04 \times 58 = 2,32 \text{ lb}$$

$$21,32 \text{ lb}$$

$$\text{Peso molecular medio} = 21,32 \text{ (30-1)}$$

2.

Llevamos el gas a condiciones normales para averiguar su peso, así:

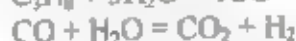
$$\begin{aligned} V_1 &= 70000 \text{ ft}^3/\text{hr} & V_2 &=? \\ P_1 &= 16 \text{ psi} & P_2 &= 14,7 \text{ psi} \\ T_1 &= 90+460 = 550^\circ\text{R} & T_2 &= 402^\circ\text{R} \\ V_2 &= 70000 \times (16/14,7) \times (492/550) = 68156 \text{ ft}^3/\text{hr} \\ \text{Peso del gas} &= 68156 \times (21,32/359) = 4047,6 \end{aligned}$$

Gas suministrado a planta de conversión = 4047,6 lb/hr (30-2)

3

Todos los gases corresponden a la fórmula C_nH_{2n+2} , de modo que se convierten en un 95% de acuerdo a la reacción (1). Para calcular el peso de H_2 debemos hacerlo a C.N.

Cuando $n = 3$:



$$\text{Gas convertido} = 68156 \times 0,95 = 64748,2 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

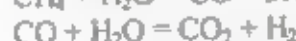
$$H_2 = 7C_3H_8 = 7 \times 64748,2 \times 0,08 = 36259 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$CO = 3C_3H_8 = 3 \times 64748,2 \times 0,08 = 15540 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2 \text{ del } CO = 0,9 \times 15540 = 13986 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2(C_3H_8) = 36259 + 13986 = 50986 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

Cuando $n = 1$:



$$H_2 = 3CH_4 = 64748,2 \times 0,78 \times 3 = 151511 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2 \text{ del } CO = 64748,2 \times 0,78 \times 0,9 = 45453 \text{ "}$$

$$H_2(CH_4) = 151511 + 45453 = 196964 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

Cuando $n = 2$:



$$H_2 = 5C_2H_6 = 5 \times 64748,2 \times 0,1 = 32374,1 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2 \text{ del } CO = 2 \times 64748,2 \times 0,1 \times 0,9 = 11655 \text{ "}$$

$$H_2(C_2H_6) = 32374 + 11655 = 44029 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

Cuando $n = 4$:



$$H_2 = 9C_4H_{10} = 9 \times 64748,2 \times 0,04 = 23309 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H_2 \text{ del } CO = 4 \times 64748,2 \times 0,04 \times 0,9 = 9324 \text{ "}$$

$$H_2(C_4H_{10}) = 32633 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$\text{Total } H_2 \text{ producido} = 50245 + 44029 + 196964 + 32633 = 323871 \text{ ft}^3/\text{hr}$$

$$H \text{ producido} = 323871 \times (2/359) = 1804,3 \text{ lb/hr}$$

Hidrógeno producido = 1804,3 lb/hr (30-3)

EJERCICIO N° 31 (8)

En la fabricación de sosa por el proceso LeBlanc, se calienta sulfato sódico con carbón y carbonato sódico.

La pasta resultante tiene la siguiente composición.

Na_2CO_3	42%
Otras sustancias insolubles en agua	6%
Materia insoluble (carbón, CaS, etc.)	52%

La pasta se trata con agua para extraer el carbonato sódico. El residuo sólido de este tratamiento, tiene la siguiente composición:

Na_2CO_3	4,0%
Otras sustancias insolubles en agua	0,5%
Materia insoluble	85,0%
Agua	10,5%

PREGUNTAS

1. Calcular el peso del residuo que queda del tratamiento de 1,0 tonelada de pasta
2. Calcular el peso del carbonato sódico extraído, por tonelada de pasta.

SOLUCION

1

Base = 1 tonelada de pasta = 2000 lb de pasta

Llamemos W = peso del residuo:

$$\begin{array}{rcl} \text{Peso de materia insoluble en pasta} & = & \text{Peso de materia insoluble en residuo} \\ 2000 \times 0,52 & = & 0,85W \end{array}$$

$$W = 2000 \times 0,52 / 0,85 = 1223,53$$

$$\text{Peso del residuo} = 1223,53 \text{ lb (31-1)}$$

2

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (extraído)} = \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (cargado)} - \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (residuo)}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (cargado)} = 2000 \times 0,42 = 840 \text{ lb}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (residuo)} = 1223,53 \times 0,04 = 48,94 \text{ lb}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (extraído)} = 840 - 48,94 = 791,06$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (extraído)} = 791,06 \text{ lb (31-2)}$$

EJERCICIO Nº 32 (8)

El fósforo se prepara, calentando en un horno eléctrico una masa perfectamente mezclada de fosfato de calcio, arena y carbón.

Puede suponerse que en una cierta carga existen las condiciones siguientes:

- La cantidad de sílice empleada está en un 10% de exceso de la que teóricamente se necesita para combinarse con el calcio, a fin de formar silicato.
- El carbón se encuentra en un 40% de exceso respecto al necesario para combinarse como CO con el oxígeno que llevaría todo el fósforo como pentóxido.

PREGUNTAS

1. Calcular la composición (%) de la carga inicial
2. Calcular las libras de fósforo obtenidas, a partir de 100 libras de carga suponiendo que la descomposición del fosforo por la SiO_2 es del 90% y que la reducción del P_2O_5 liberado por el carbón, se completa en un 70%.

SOLUCION

1

Reacciones



Pesos atómicos

$$\text{P}=31; \text{Ca}=40; \text{O}=16; \text{Si}=28; \text{C}=12$$

Pesos moleculares:

$$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 310$$

$$\text{SiO}_2 = 60$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 142$$

Asumimos 100 libras de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$:

En (1):

$$\text{SiO}_2 = 100 \cdot (3 \times 60 / 310) = 58,06 \text{ lb}$$

Dado que hay un 10% de SiO_2 en exceso:

$$\text{SiO}_2 \text{ (total)} = 58,06 \times 1,1 = 63,87 \text{ lb}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 \text{ formado} = 100 \cdot (142 / 310) = 45,81 \text{ lb}$$

En (2):

$$C = 45,81 \cdot (5 \times 12 / 142) = 19,35 \text{ lb}$$

Dado que hay un 40% de C en exceso:

$$C(\text{total}) = 19,35 \times 1,4 = 27,10 \text{ lb}$$

La composición de la carga inicial sería (32-1):

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	100,00 lb	52,26%
Arena (SiO_2)	63,87	33,45%
Carbón (C)	27,10	14,19%
	190,97 lb	100,00

2.

Para 100 libras de carga:

$$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 100 \times 0,5236 = 52,36 \text{ lb}$$

$$\text{SiO}_2 = 100 \times 0,3345 = 33,45$$

$$\text{C} = 100 \times 0,1419 = 14,19$$

$$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{ descompuesto} = 52,36 \times 0,9 = 47,124 \text{ lb}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 \text{ formado} = 47,124 \cdot (142/310) = 21,59 \text{ lb}$$

$$\text{P (producido)} = 21,59 \cdot (2 \times 31 / 142) \times 0,7 = 6,597 \text{ lb}$$

$$\text{Fósforo producido} = 6,6 \text{ lb (32-2)}$$

EJERCICIO N° 33 (8)

Puede prepararse el CO_2 puro, tratando piedra caliza con ácido sulfúrico.

La piedra caliza empleada en tal proceso contenía CaCO_3 y MgCO_3 , siendo lo restante materia muerta insoluble.

El ácido empleado contenía un 12% de H_2SO_4 en peso, el residuo del proceso tenía la siguiente composición:

CaSO_4	8,56%
MgSO_4	5,23
H_2SO_4	1,05
Inertes	0,53
CO_2	0,12
H_2O	84,51

Durante el proceso, se calentó la masa y se desprendieron el CO_2 y el vapor de agua

PREGUNTAS

1. Calcular el análisis de la caliza empleada.
2. Calcular el porcentaje del exceso del ácido empleado.
3. Calcular el peso y el análisis de la materia destilada de la masa de reacción, por 1000 libras de caliza tratada.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos

$$\text{Ca}=14; \text{Mg}=24; \text{C}=12; \text{O}=16; \text{S}=32$$

Pesos moleculares:

$$\text{CaSO}_4 = 136$$

$$\text{MgSO}_4 = 120$$

$$\text{CaCO}_3 = 100$$

$$\text{MgCO}_3 = 84$$

Supongamos 100 lb de residuo

$$\text{Inertes} = 100 \times 0,0053 = 0,53 \text{ lb}$$

$$\text{CaSO}_4 = 100 \times 0,0856 = 8,56 \text{ lb}$$

$$\text{MgSO}_4 = 100 \times 0,0523 = 5,23 \text{ lb}$$

$$\begin{aligned}\text{Ca en CaSO}_4 &= 8,56 \cdot (40/136) = 2,52 \text{ lb} \\ \text{Mg en MgSO}_4 &= 5,23 \cdot (24/120) = 1,05 \text{ lb.}\end{aligned}$$

Análisis de la piedra caliza (33-1)

$$\begin{aligned}\text{CaCO}_3 &= 2,52 \cdot (100/40) = 6,30 \text{ lb} = 59,94\% \\ \text{MgCO}_3 &= 1,05 \cdot (84/24) = 3,68 = 35,02 \\ \text{Inertes} &= \frac{0,53}{10,51 \text{ lb}} = \frac{5,04}{100,00\%}\end{aligned}$$

2.

Pesos moleculares:

$$\begin{aligned}\text{H}_2\text{SO}_4 &= 98 \\ \text{SO}_4 &= 96\end{aligned}$$

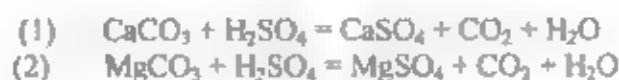
$$\begin{aligned}\text{SO}_4 \text{ en } (\text{CaSO}_4) &= 8,56 - 2,52 = 6,04 \text{ lb} \\ \text{SO}_4 \text{ en } (\text{MgSO}_4) &= 5,23 - 1,05 = 4,18 \text{ lb} \\ \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ en estos} &= (6,04 + 4,18) \cdot (98/96) = 10,43 \text{ lb}\end{aligned}$$

El H_2SO_4 reacciona para formar estos dos compuestos, de modo que el que se encuentra en el residuo, es el exceso:

$$\begin{aligned}\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ exceso} &= 1,05/10,43 = 10,07\% \\ \text{Exceso de ácido} &= 10,07\% \quad (33-2)\end{aligned}$$

3

Reacciones.



En 1000 libras de piedra caliza.

$$\begin{aligned}\text{Inertes en caliza} &= \text{Inertes en residuo} \\ 1000 \times 0,0504 &= 0,0053 \times \text{Residuo} \\ \text{Residuo} &= (1000 \times 0,0504) / 0,0053 = 9509,43 \text{ lb} \\ \text{CO}_2 \text{ en este} &= 9509,43 \times 0,0012 = 11,41 \text{ lb} \\ \text{CO}_2 \text{ en CaCO}_3 &= 1000 \times 0,5994 \cdot (44/100) = 263,74 \text{ lb} \\ \text{CO}_2 \text{ en MgCO}_3 &= 1000 \times 0,3502 \cdot (44/84) = 183,44 \text{ lb} \\ \text{CO}_2 \text{ destilado} &= 263,74 + 183,44 - 11,41 = 435,77 \text{ lb}\end{aligned}$$

De las reacciones (1) y (2):

$$\begin{aligned}\text{H}_2\text{O (vapor)} &= 1000 \times 0,5994 \cdot (18/100) + 1000 \times 0,3502 \cdot (18/84) = 182,93 \text{ lb} \\ \text{Destilado (33-3):} \\ \text{CO}_2 &= 435,77 \text{ lb} = 70,43\% \\ \text{H}_2\text{O} &= \frac{182,93 \text{ lb}}{618,70 \text{ lb}} = \frac{29,57\%}{100,00\%}\end{aligned}$$

EJERCICIO N° 34 (8)

El carbonato bórico (BaCO_3) es de importancia comercial como materia prima para la obtención de otros compuestos de bario. En su preparación, primero se obtiene BaS calentando el sulfuro natural, baritas (BaSO_4), con carbón.

El BaS se extrae de esta masa con agua y la disolución se trata con carbonato sódico (Na_2CO_3), para precipitar el carbonato bórico.

En la operación de tal proceso se encontró que la disolución de BaS formada contenía también algo de CaS, procedente de las impurezas de la barita.

La disolución se trató con Na_2CO_3 , y la masa precipitada de carbonatos de Ca y Ba se separó por filtración.

Se encontró que por cada 100 libras de filtrado recogido, se obtuvieron 10 libras de precipitado seco.

El análisis del precipitado es.

CaCO_3	9,9%
BaCO_3	90,1%

El análisis del filtrado fue:

Na_2S	6,85%
Na_2CO_3	2,25%
H_2O	90,90%

El Na_2CO_3 para la precipitación se añadió en forma de sosa anhidra que contenía CaCO_3 como impureza.

PREGUNTAS

1. Determinar el porcentaje de Na_2CO_3 empleado en exceso del requerido, para precipitar el BaS y el CaS .
2. Determinar la composición de la disolución inicial de sulfuros de Ba y Ca. Nota: El BaS se encuentra en realidad descompuesto en disolución, existiendo el compuesto $\text{OH}^+\text{BaS}^+5\text{H}_2\text{O}$. Sin embargo, en esta reacción el cálculo total puede realizarse, y la composición se expresa como si el compuesto en disolución fuese BaS .
3. Calcular la composición de la sosa seca empleada en la precipitación.

SOLUCION

1

Pesos atómicos

$$\text{Na}=23; \text{Ba}=137,4$$

Pesos moleculares

$$\text{Na}_2\text{S} = 78$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 = 106$$

Reacciones.



$$\text{Na}_2\text{S} = 100 \times 0,0685 = 6,85 \text{ lb}$$

$$\text{Na de este} = 6,85 \cdot (2 \times 23 / 78) = 4,04 \text{ lb}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ de reacciones} = 4,04 \cdot (106 / 2 \times 23) = 9,31 \text{ lb}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ exceso} = 2,25 \text{ lb (exceso debido a que no reaccionó)}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ exceso} = 100 \cdot (2,25 / 9,31) = 24,17\%$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ exceso} = 24,17\% (34-1)$$

2

Pesos moleculares

$$\text{BaS} = 169,4$$

$$\text{BaCO}_3 = 197,4$$

$$\text{CaS} = 72$$

$$\text{BaCO}_3 = 16,45 \times 0,901 = 14,82 \text{ lb}$$

$$\text{CaCO}_3 = 16,45 - 14,82 = 1,63 \text{ lb}$$

Reacción (2)

$$\text{BaS} = 14,82 \cdot (169,4 / 197,4) = 12,72 \text{ lb}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ de este BaS} = 14,82 \cdot (106 / 187,4) = 7,96 \text{ lb}$$

Reacción (3)

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ para CaS} = 9,31 - 7,96 \text{ lb}$$

$$\text{CaS} = 1,35 \cdot (72 / 106) = 0,92 \text{ lb}$$

Disolución inicial (34-2)

$$\begin{array}{rcl}
 \text{H}_2\text{O} & = & 100 \times 0,909 = 90,90 \text{ lb} = 86,95\% \\
 \text{BaS} & = & 12,72 \text{ lb} = 12,17\% \\
 \text{CaS} & = & \frac{0,92 \text{ lb}}{104,54 \text{ lb}} = 0,88\% \\
 & & 104,54 \text{ lb} \quad 100,00\%
 \end{array}$$

3

$$\begin{array}{l}
 \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ total} = 9,31 + 2,25 = 11,56 \text{ lb} \\
 \text{CaCO}_3 \text{ del CaS} = 0,92 \cdot (100/72) = 1,28 \text{ lb} \\
 \text{CaCO}_3 \text{ de la sosa} = 16,45 \times 0,099 \cdot 1,28 = 0,35 \text{ lb}
 \end{array}$$

Sosa seca (34-3)

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Na}_2\text{CO}_3 & = & 11,56 \text{ lb} = 97,06\% \\
 \text{CaCO}_3 & = & \frac{0,35 \text{ lb}}{11,91 \text{ lb}} = 2,94\% \\
 & & 11,91 \text{ lb} \quad 100,00\%
 \end{array}$$

EJERCICIO N° 35 (8)

Un vidrio para la obtención de productos químicos está compuesto por silicatos y boratos de diversos metales básicos. Su composición es la siguiente:

$$\begin{array}{l}
 \text{SiO}_2 = 66,2\% \\
 \text{B}_2\text{O}_3 = 8,2 \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 = 1,1 \\
 \text{ZnO} = 10,3 \\
 \text{MgO} = 6,0 \\
 \text{Na}_2\text{O} = 8,2
 \end{array}$$

PREGUNTAS

1. Determinar si en este vidrio se encuentran en exceso los constituyentes ácidos o básicos, y el porcentaje de exceso de poder reactivo por encima del teóricamente requerido para un vidrio neutro. (Supóngase que el Al_2O_3 actúa como base y que el B_2O_3 como ácido, HBO_2)

SOLUCION

1.

En términos del MgO , determinamos el equivalente básico de todos los compuestos básicos, y en términos del SiO_2 los equivalentes ácidos y los comparamos estequiométricamente

Pesos moleculares.

$$\begin{array}{l}
 \text{SiO}_2 = 60 \\
 \text{B}_2\text{O}_3 = 70 \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 = 102 \\
 \text{ZnO} = 81,4 \\
 \text{MgO} = 40,3 \\
 \text{Na}_2\text{O} = 62
 \end{array}$$

Compuestos básicosCompuestos ácidos

Al_2O_3
 ZnO
 MgO
 Na_2O

SiO_2
 B_2O_3

El equivalente de un compuesto A en otro B, consiste en determinar una mol del primero a cuantas moles del segundo equivale, en peso.

$$\text{MgO equivalente} = 6,0 + 1 \cdot (40,3/102) + 10,3 (40,3/81,4) + 8,2 (40,3/62) = 6,86\%$$

$$\text{SiO}_2 \text{ equivalente} = 66,2 + 8,2 \cdot (60/70) = 73,23\%$$

$$\text{Vidrio neutro} = \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$$

$$\text{SiO}_2 \text{ requerido} = 16,86 (60/40,3) = 25,10\%$$

Hay un exceso de ácido (35-1).

$$\text{Acido en exceso} = 73,23 - 25,10 = 48,13\%$$

$$\text{Acido en exceso} = 48,13\% (35-1)$$

EJERCICIO N° 36 (8)

Un agua contiene los siguientes metales expresados en miligramo por litro: Ca 32, Mg=8,4; Fe(ferroso)=0,5.

PREGUNTAS

1. Calcular la dureza total del agua, expresada en mg. de CaCO_3 equivalentes, el Ca del cual, tendría el mismo poder reactivo que el poder reactivo total de los metales presentes.
2. Suponiendo que estos metales están todos combinados como bicarbonatos, calcule el precio de la cal necesaria para ablandar 1000 galones de agua. La cal comercial que tiene un 90%CaO cuesta \$8,50 por tonelada.

SOLUCION

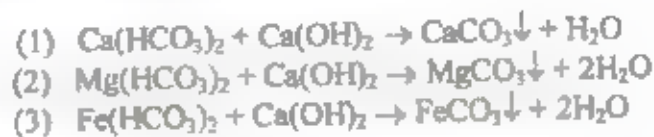
1.
Pesos atómicos
Ca 40, Mg 24, Fe 56
Pesos moleculares
 $\text{CaCO}_3 = 100$

$$\begin{aligned}\text{Ca equivalente} &= 32 + 8,4 \cdot (40/24) + 0,5 \cdot (40/56) = 46,36 \text{ mg.} \\ \text{CaCO}_3 \text{ equivalente} &= 46,36 \cdot (100/40) = 115,89 \text{ mg.} \\ \text{Dureza total (CaCO}_3) &= 115,89 \text{ mg. (36-1)}\end{aligned}$$

2.
1 galón = 3,785 lts
Bicarbonatos:
 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (162)
 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ (146)
 $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ (178)

Otros
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (74)
CaO (56)

Los números entre paréntesis son los pesos moleculares.
Reacciones de ablandamiento del agua (10):



Cálculo de los bicarbonatos:

$$\begin{aligned}\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 &= 32 \cdot (162/40) = 129,6 \text{ mg.} \\ \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 &= 8,4 \cdot (146/24) = 51,1 \text{ mg.} \\ \text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 &= 0,5 \cdot (178/56) = 1,6 \text{ mg.}\end{aligned}$$

Cálculo del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ consumido

$$\begin{aligned}\text{Ca}(\text{OH})_2 (1) &= 129,6 \cdot (74/162) = 59,20 \text{ mg} \\ \text{Ca}(\text{OH})_2 (2) &= 51,1 \cdot (74/146) = 25,90 \text{ mg} \\ \text{Ca}(\text{OH})_2 (3) &= 1,6 \cdot (74/178) = 0,67 \text{ mg.} \\ \text{Total Ca}(\text{OH})_2 &= 85,77 \text{ mg}\end{aligned}$$



$$\text{CaO (4)} = 85,77 \cdot (56/74) = 64,91 \text{ mg/lts}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1000 \times 3,785 = 3785 \text{ lbs}$$

$$\text{CaO total consumido} = 64,91 \times 3785 = 245684,35 \text{ mg.}$$

$$\text{CaO comercial} = 245684,35 / 0,95 = 258615,11 \text{ mg.}$$

$$\text{Cal comercial} = 2,58615 \times 10^{-4} \text{ ton.}$$

$$1 \text{ tonelada de esta cal cuesta } 8,5 \times 100 = 850 \text{ ctvs de dólar.}$$

$$\text{Precio de la cal} = 850 \times 2,58615 \times 10^{-4} = 0,22 \text{ ctvs}$$

$$\text{Precio de la cal} = 0,22 \text{ ctvs (36-2)}$$

EJERCICIO N° 37 (9)

Calentando en un crisol a 1100°C una mezcla de magnetita y carbono, se produce hierro metálico.

Los gases producidos durante el proceso promedian $80\% \text{ CO}$ y $20\% \text{ CO}_2$

PREGUNTAS

1. El consumo de carbono, en libras de carbono reaccionando por libra de hierro producido.
2. El volumen de gases producidos, en pies cúbicos (C.N.) por tonelada de hierro producido.
3. El volumen del gas producido por tonelada de hierro, medido a 1100°C y 740 mm de presión total.

SOLUCION

1.

Pesos atómicos

$$\text{Fe}=56; \text{C}=12, \text{O}=16$$

Pesos moleculares.

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = 56 \times 3 + 16 \times 4 = 232$$

La reacción que ocurre es la siguiente:



Debemos calcular el gas producido en las proporciones establecidas por el ejercicio para a partir de ello poder determinar el C. Pero para realizar el cálculo del gas debemos primero calcular la cantidad de magnetita que es la que aporta el oxígeno para el gas, de acuerdo a la reacción planteada.

Base = 1 lb de Fe.

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = 1 \cdot (232/3 \times 56) = 1,381 \text{ lb}$$

El cálculo del gas lo vamos a realizar de conformidad con la siguiente expresión

$$\text{ft}^3 \text{ de gas} = \frac{\text{O total en gas}}{\text{ft}^3 \text{ de gas}}$$

Esto significa que los pies cúbicos de gas se consiguen dividiendo el oxígeno total en los gases por el oxígeno que tiene un ft^3 de gas.

Si al Fe_3O_4 le restamos el Fe encontramos el O.

$$\text{O total en gas} = 1,381 - 1 = 0,381 \text{ lb}$$

Asumamos 1 ft^3 de gas:

$$\text{En 1 ft}^3 \text{ de gas: CO} = 0,8 \text{ ft}^3 \text{ y CO}_2 = 0,2 \text{ ft}^3$$

Recordemos que el peso molecular expresado en libras, ocupa 359 ft^3 .

$$\text{O en CO} = 0,8 \cdot (16/359) = 0,036 \text{ lb}$$

$$\text{O en CO}_2 = 0,2 \cdot (32/359) = 0,018 \text{ lb}$$

$$\text{O/ft}^3 \text{ de gas} = 0,036 + 0,018 = 0,054 \text{ lb}$$

$$\text{Gas} = 0,381 \text{ lb} \div 0,054 \text{ lb/ft}^3 = 7,056 \text{ ft}^3 \text{ de Fe producido}$$

$$\begin{aligned} C \text{ en CO} &= 7,056 \times 0,8 \cdot (12/359) = 0,189 \text{ lb} \\ C \text{ en CO}_2 &= 7,056 \times 0,2 \cdot (12/359) = 0,047 \text{ lb} \\ \text{Total C} &= 0,189 + 0,047 = 0,236 \text{ lb} \\ C &= 0,236 \text{ lb/lb de Fe (37-1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \\ 1 \text{ tonelada corta} &= 2000 \text{ lb} \\ \text{Gas/lb de Fe producido} &= 7,056 \text{ ft}^3 \\ \text{Gas/ton. De Fe producido} &= 7,056 \times 2000 = 14112 \text{ ft}^3 \\ \text{Gas} &= 14112 \text{ ft}^3/\text{tonelada de Fe producido (37-2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \\ \text{Debemos llevar este gas a las condiciones dadas, aplicando la ley de los gases ideales.} \\ P_1 = 960 \text{ mm} \quad P_2 = 740 \text{ mm} \\ T_1 = 273 \text{ K} \quad T_2 = 1373 \text{ K} \\ V_1 = 14112 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_2 &= 14112 \cdot (760/273) \cdot (1373/740) = 72892 \text{ ft}^3 \\ V_2 &= 72892 \text{ ft}^3 \text{ (37-3)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N° 38 (9)

Una mezcla de 50%CO y 50%CO₂ se pasa dentro de un horno de laboratorio a la velocidad de 100 ml/min, y deposita C por la reacción



El gas que sale del horno contiene 51%CO₂ y 49%CO.

PREGUNTAS

1. Calcular la cantidad de carbono depositado en el horno, en mg/hr

SOLUCION

1.
Dado que la reacción no se realiza por completo, habrá que calcular la cantidad de CO que se descompone/min.

$$\begin{array}{lcl} \text{Al inicio:} & 0,5 & 0,5 \\ & 2\text{CO} & \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C} \\ \text{Al final:} & 0,5-2x & 0,5+x \end{array}$$

$$\begin{aligned} x &= \text{moles de CO}_2 \text{ formados} \\ 0,5+x &= \text{moles de CO}_2 \text{ al final del proceso} \\ 0,5-2x &= \text{CO} \\ \text{Total de moles en equilibrio} &= 0,5-2x + 0,5+x = 1-x \\ 1) \text{ fracción molar del CO} &= (0,5-2x)/(1-x) = 0,49 \\ 2) \text{ " " CO}_2 &= (0,5+x)/(1-x) = 0,51 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Despejando "x" en (1):} \\ x &= 0,006623 \text{ moles} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Despejando "x" en (2):} \\ x &= 0,006623. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Al final} \\ \text{CO} &= 0,5 - 0,006623 \times 2 = 0,486754 = 49\% \\ \text{CO}_2 &= 0,5 + 0,006623 = 0,506623 = 51\% \\ & \quad \quad \quad 0,993377 \end{aligned}$$

De acuerdo a la reacción.

$$C \text{ depositado} = 0,0013246 \cdot (12/2 \times 22,4) = 0,000355 \text{ g/min}$$

$$C \text{ depositado} = 0,000355 \text{ (g/min)} \cdot (1000 \text{ mg/1 g}) \cdot (60 \text{ min/1 hr}) = 21,2882$$

$$C \text{ depositado} = 21,3 \text{ mg/hr (38-1)}$$

EJERCICIO N° 39 (9)

100 toneladas de plomo duro (98%Pb, 2%Sb), se funden en una olla de acero y entonces se tratan con 2 toneladas de PbO (ver Fig. 6). Los productos son:

- 1) Una escoria consistente en PbO y Sb₂O₃, analizando 20%Sb.
- 2) Una aleación de Pb-Sb de bajo contenido de Sb y un contenido de oxígeno despreciable.

PREGUNTAS

1. Calcular el contenido de antimonio en la aleación.

SOLUCION

1
Pesos atómicos
Pb = 207,2, Sb = 121,8
Pesos moleculares.
Sb₂O₃ = 291,6
PbO = 223,2



Figura N° 6: Preparación de aleación de Pb.

Distribución de la composición de la escoria y su peso:

$$\% \text{Sb}_2\text{O}_3 \text{ en escoria} = 20 \cdot (291,6/243,2) = 24\%$$

$$\% \text{O}_2 \text{ en Sb}_2\text{O}_3 \text{ de escoria} = 24 - 20 = 4\%$$

$$\% \text{PbO en escoria} = 100 - 24 = 76\%$$

$$\% \text{O}_2 \text{ en PbO escoria} = 76 \cdot (16/223,2) = 5,4\%$$

$$\% \text{O}_2 \text{ total en escoria} = 4 + 5,4 = 9,4\%$$

$$\% \text{Pb} = 76 - 5,4 = 70,6\%$$

El oxígeno de la carga está en forma de PbO:

$$\text{Peso de O}_2 \text{ en la carga} = 2 \cdot (16/223,2) = 0,14 \text{ ton.}$$

Cálculo del peso de la escoria.

Sea x = peso de la escoria

$$0,14 = 0,094x \therefore$$

$$x = \text{escoria} = 0,14/0,094 = 1,5 \text{ ton.}$$

$$\text{Pb en PbO cargado} = 2 \cdot (207,2/223,2) = 1,86 \text{ ton}$$

$$\text{Pb escoria} = 1,5 \times 0,706 = 1,06 \text{ ton}$$

$$\text{Sb escoria} = 1,5 \times 0,2 = 0,3 \text{ ton}$$

$$\text{Sb total} = \text{Sb(escoria)} + \text{Sb(aleacion)} = 2 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}\text{Pb total} &= \text{Pb(escoria)} + \text{Pb(aleación)} = 98 + 1,86 = 99,86 \text{ ton} \\ \text{Sb aleación} &= 2 - 0,3 = 1,7 \text{ ton} \\ \text{Pb aleación} &= 99,86 - 1,06 = 98,8 \text{ ton} \\ \text{Aleación} &= 98,8 + 1,7 = 100,5 \text{ ton} \\ \text{Sb aleación} &= (1,7/100,5) \times 100 = 1,69\% \\ \text{Sb aleación} &= 1,69\% (39-1)\end{aligned}$$

EJERCICIO N° 40 (9)

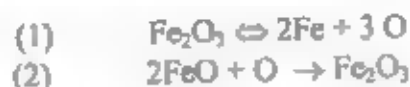
En un crisol de platino, bajo una atmósfera inerte se funde una escoria cuyo análisis es $\text{FeO} = 45\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10\%$, $\text{SiO}_2 = 35\%$, y se halla que 100 g. de escoria pierden 1 gramo de hierro que se disuelve como Fe en el platino sólido.
No hay pérdidas de Si ni de O.

PREGUNTAS

- Determinar el análisis de la escoria después de la fusión, como $\%\text{FeO}$, $\%\text{Fe}_2\text{O}_3$ y $\%\text{SiO}_2$.

SOLUCION

1.
En este caso debido a que el grado de oxidación del Fe en la forma Fe_2O_3 es mayor que en la forma FeO , debe descomponerse algo del primero; pero como no hay pérdida de oxígeno debe oxidarse algo del segundo, veamos las siguientes reacciones



Inicialmente

$$\begin{aligned}\text{FeO} &= 55 \text{ g} \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 10 \text{ g} \\ \text{SiO}_2 &= 35 \text{ g} \\ &100 \text{ g}\end{aligned}$$

Se disuelve 1 g de Fe que sale del Fe_2O_3 que se descompuso, por tanto, de acuerdo a (1).

$$\begin{aligned}\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ descompuesto} &= 1 \cdot (160/112) = 1,43 \text{ g} \\ \text{O de este} &= 1,43 - 1 = 0,43 \text{ g}.\end{aligned}$$

De acuerdo a (2):

$$\begin{aligned}\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 0,43 \cdot (2 \times 72/16) = 3,87 \text{ g} \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ formado} &= 0,43 \cdot (160/16) = 4,3 \text{ g}\end{aligned}$$

Pesos finales:

$$\begin{aligned}\text{Fe}_2\text{O}_3 &= 10 - 1,43 + 4,3 = 12,87 \text{ g} \\ \text{FeO} &= 55 - 3,87 = 51,13 \text{ g} \\ \text{SiO}_2 &= 35,0 \text{ g}\end{aligned}$$

Composición final de la escoria (40-1)

$$\begin{array}{rcl}\text{Fe}_2\text{O}_3 &= 12,87 \text{ g} &= 13,00\% \\ \text{FeO} &= 51,13 \text{ g} &= 51,65\% \\ \text{SiO}_2 &= 35,00 \text{ g} &= 35,35\% \\ \hline &99,0 \text{ g} &100,00\%\end{array}$$

EJERCICIO N° 41 (9)

Un concentrado de Zn por flotación, sustancialmente ZnS puro se tuesta a ZnO sin combustible.
Los gases de tostador contienen $6\%\text{SO}_2$ y $1\%\text{SO}_3$, el resto es N_2 y O_2 .

PREGUNTAS

1. Calcular la cantidad de aire seco alimentado al aparato tostador, en pies cúbicos por tonelada corta de ZnS estándar

SOLUCION

1.

Base: ZnS = 1 ton, Corta = 2000 lb

Reacción.



Vamos a calcular el volumen del gas así:

$$\text{ft}^3 \text{ de gas} = \frac{\text{S total en gas}}{\text{S}} \text{ ft}^3 \text{ de gas}$$

Esto quiere decir que debemos calcular el S que en total poseen los gases y dividirlo por el S que contiene 1 ft³ de gas.

Debido a que todo el S lo contiene el ZnS:

$$\text{S total en gas} = 2000 \cdot (32/97,4) = 657,1 \text{ lb}$$

Supongamos ahora 1 ft³ de gas y calculemos cuanto S contiene:

$$\text{S en SO}_2 = 0,06 \cdot (32/359) = 0,00535 \text{ lb}$$

$$\text{S en SO}_3 = 0,01 \cdot (32/359) = 0,00089 \text{ lb}$$

$$\text{S/ft}^3 \text{ de gas} = 0,00535 + 0,00089 = 0,00624 \text{ lb}$$

De acuerdo a la ecuación anterior:

$$\text{Gas} = 657,1 / 0,00624 = 105304,5 \text{ ft}^3$$

Cálculo del aire teórico:

$$\text{ZnO formado} = 2000 \cdot (81,4/97,4) = 1671,46 \text{ lb}$$

$$\text{O}_2 \text{ de este} = 1671,46 \cdot (16/81,4) \cdot (359/32) = 3685,84 \text{ ft}^3$$

Formación del SO₂:



$$\text{O}_2 = \text{SO}_2 = 105304,5 \times 0,06 = 6318,27 \text{ ft}^3$$

Formación del SO₃:



$$\text{O}_2 = 1,5 \text{SO}_3 = 105304,5 \times 0,01 \times 1,5 = 1579,57 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2(\text{teórico}) = \text{O}_2(\text{ZnO}) + \text{O}_2(\text{SO}_2) + \text{O}_2(\text{SO}_3)$$

$$\text{O}_2(\text{teórico}) = 3685,84 + 6318,27 + 1579,57 = 11583,68 \text{ ft}^3$$

Gas = SO₂ + SO₃ + N₂(teórico) + aire exceso

De acuerdo a la composición del gas:

$$\text{N}_2(\text{teórico}) + \text{aire exceso} = 100 - 6 - 1 = 93\%$$

Recordar que el aire posee en volumen 79%N₂ y 21%O₂:

$$\text{N}_2(\text{teórico}) = 11583,68 \cdot (79/21) = 43576,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2(\text{teórico}) + \text{aire exceso} = 105304,5 \times 0,93 = 97933,2 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 97933,2 - 43576,7 = 54356,5 \text{ ft}^3$$

Aire total seco = aire teórico + aire exceso

$$\text{Aire total seco} = 43576,7 / 0,79 + 54356,5 = 109517 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 109517 \text{ ft}^3 \text{ por ton. de ZnS (41-1)}$$

EJERCICIO N° 42 (9)

Se tuestan continuamente con aire seco, 50 toneladas cortas por 24 horas de un concentrado por flotación. Este concentrado contiene.

ZnS = 80%

FeS₂ = 5%

PbS = 5%

Balance = minerales de ganga inertes

Supongamos que la tostación convierte:



Todo el S de estos compuestos entra al producto gaseoso como SO_2 y SO_3

Los gases que salen del sistema analizan 5% SO_2 y 1.5% SO_3

PREGUNTAS

1. La cantidad de aire que entra en el tostador, en ft^3/min a C N
2. El aire en exceso, como % de la cantidad teóricamente requerida por las reacciones.
3. El análisis completo de los gases que salen del tostador
4. La cantidad de H_2SO_4 que podría producirse de los gases, suponiendo la conversión de todo el azufre; en toneladas cortas por 24 horas.

SOLUCION

1. Debemos calcular el volumen gaseoso para poder deducir de él, el aire así

$$\text{ft}^3 \text{ de gas} = \frac{\text{S total en gas}}{\text{S}} \text{ ft}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Concentrado} = 50 \times 2000 = 100000 \text{ lb}$$

$$\text{ZnS} = 100000 \times 0.8 = 80000 \text{ lb}$$

$$\text{PbS} = 100000 \times 0.05 = 5000 \text{ lb}$$

$$\text{FeS}_2 = 100000 \times 0.05 = 5000 \text{ lb}$$

Todo el S que va a los gases se encuentra en los sulfuros:

$$\text{S en ZnS} = 80000 \times (32/97.4) = 26283.4 \text{ lb}$$

$$\text{S en PbS} = 5000 \times (32/239.2) = 668.9 \text{ lb}$$

$$\text{S en FeS}_2 = 5000 \times (2 \times 32/120) = 2666.7 \text{ lb}$$

$$\text{S total en gas} = 26283.4 + 668.9 + 2666.7 = 29619 \text{ lb}$$

Asumo 1 ft^3 de gas:

$$\text{S en SO}_2 = 0.05 \times (32/359) = 0.00446 \text{ lb}$$

$$\text{S en SO}_3 = 0.015 \times (32/359) = 0.00134 \text{ lb}$$

$$\text{S/ft}^3 \text{ de gas} = 0.00446 + 0.00134 = 0.0058$$

Aplicando la ecuación anterior:

$$\text{Volumen de gas} = 29619 / 0.0058 = 5'106.724 \text{ ft}^3 / 24 \text{ hr.}$$

Cálculo del O_2 teórico:

$$\text{Zn cargado} = 80000 - 26283.4 = 53716.6 \text{ lb}$$

$$\text{ZnO formado} = 53716.6 \times (81.4/65.4) = 66858.3 \text{ lb}$$

$$\text{O}_2 \text{ del ZnO} = (66858.3 - 53716.6) \times (359/32) = 147433 \text{ ft}^3$$

$$\text{Pb cargado} = 5000 - 668.9 = 4331.1 \text{ lb}$$

$$\text{PbO formado} = 4331.1 \times (223.2/207.2) = 4665.5 \text{ lb}$$

$$\text{O}_2 \text{ del PbO} = (4665.5 - 4331.1) \times (359/32) = 3752 \text{ ft}^3$$

$$\text{Fe cargado} = 5000 - 2666.7 = 2333.3 \text{ lb}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ formado} = 2333.3 \times (232/3 \times 56) = 3222.2 \text{ lb}$$

$$\text{O}_2 \text{ del Fe}_3\text{O}_4 = (3222.2 - 2333.3) \times (359/32) = 9972 \text{ ft}^3$$



$$\text{O}_2 = \text{SO}_2 = 5'106.724 \times 0.05 = 255336 \text{ ft}^3$$



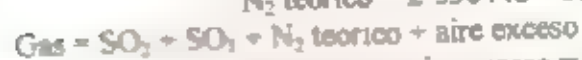
$$\text{SO}_3 = 5'106.724 \times 0.015 = 76601 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del SO}_3 = 76601 \times 1.5 = 114901 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ teórico total} = 147433 + 3752 + 9972 + 255336 + 114901 = 531394 \text{ ft}^3 / 24 \text{ hr}$$

$$\text{Aire teórico} = 531394 / 0.21 = 2'530448 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ teórico} = 2'530448 - 531394 = 1'999054 \text{ ft}^3$$



$$\text{N}_2 \text{ teórico} + \text{aire exceso} = 100 - 5 - 1.5 = 93.5\%$$

$$\text{Aire teórico} + \text{aire exceso} = 5'106.724 \times 0.935 = 4'774787 \text{ ft}^3$$

$$\begin{aligned}\text{Aire exceso} &= 4'774787 - 1'999054 = 2'775733 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire total/24 hr} &= 2'775733 + 2530448 = 5'306181 \text{ ft}^3/24 \text{ hr} \\ \text{Aire al tostador} &= (5'306181 \text{ ft}^3/24 \text{ hr}) \times (1 \text{ hr}/60 \text{ min}) = 3685 \text{ ft}^3/\text{min} \\ \text{Aire al tostador} &= 3685 \text{ ft}^3/\text{min} \quad (42-1)\end{aligned}$$

2

$$\begin{aligned}\text{Aire en exceso} &= 2,775.733 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire exceso} &= (2'775.733/2'530.448) \times 100 = 109,7\% \\ \text{Aire exceso} &= 109,7\% \quad (42-2)\end{aligned}$$

3

$$\begin{aligned}\text{N}_2 \text{ total} &= 1'999\,054 + 2'775.733 \times 0.79 = 4'191.883 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 (\text{aire exceso}) &= 2'775.733 \times 0.21 = 582904 \text{ ft}^3 \\ \text{Composición del gas (42-3)} \\ \text{N}_2 &= 4'191.883 \text{ ft}^3 = 82,09\% \\ \text{O}_2 &= 582\,904 = 11,41\% \\ \text{SO}_2 &= 255\,336 = 5,00\% \\ \text{SO}_3 &= \frac{76.601}{5'106.724} = \frac{1,50\%}{100,00\%}\end{aligned}$$

4

$$\begin{aligned}\text{S total en gas} &= 29619 \text{ lb} \\ \text{H}_2\text{SO}_4 &= 296193(92/32) = 90908,2 \text{ lb/24 hr} \\ \text{H}_2\text{SO}_4 &= 90708,2/2000 = 45,4 \text{ ton./24 hr} \\ \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ que podrían producir los gases} &= 45,4 \text{ ton/24 hr.} \quad (42-4)\end{aligned}$$

EJERCICIO N° 43 (9)

En un horno se quema piritas (FeS_2) con un exceso de aire, para producir Fe_2O_3 y SO_2 . Los gases de la combustión procedentes del horno contienen 6,3% de SO_2 , siendo el resto N_2 y O_2 .

PREGUNTAS

1. Calcular por tonelada métrica de piritas, el consumo de aire teórico en m^3 a condiciones normales.
2. El consumo real de aire en metros cúbicos a C N, por tonelada métrica de piritas.
3. El porcentaje de aire en exceso.
4. El volumen de los gases productos de la combustión.

SOLUCION

1.

Base = 1 ton. métrica = 1000 Kg. de piritas.
Pesos moleculares:

$$\begin{aligned}\text{FeS}_2 &= 120 \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 160 \\ \text{SO}_2 &= 64 \\ \text{O}_2 &= 32\end{aligned}$$

Reacción de combustión



$$\begin{aligned}\text{O}_2 \text{ teórico} &= 1000 \cdot (5,5 \times 22,4 / 2 \times 120) = 513 \text{ m}^3 \\ \text{Aire teórico} &= 513 / 0,21 = 2444 \text{ m}^3 \\ \text{Aire teórico} &= 2444 \text{ m}^3 \quad (43-1)\end{aligned}$$

2.

El aire real está compuesto por aire teórico + aire exceso. O sea: $\text{Aire real} = \text{Aire teórico} + \text{Aire exceso}$.

Gases de combustión = $\text{SO}_2 + \text{N}_2 \text{ total} + \text{O}_2(\text{aire exceso})$

De acuerdo a la reacción:

$$\text{SO}_2 = 513 \cdot (4/5,5) = 373 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 + \text{O}_2(\text{aire exceso}) = 100 - 6,3 = 93,7\% \text{ de los gases de combustión}$$

$$\text{N}_2 + \text{O}_2(\text{aire exceso}) = 373 \cdot (93,7/6,3) = 5548 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire real} = 5548 + 513 = 6061 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire real} = 6061 \text{ m}^3 \text{ (43-2)}$$

$$\text{Aire exceso} = 6061 - 2444 = 3617 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = (3617/2444) \times 100 = 148\%$$

$$\text{Aire exceso} = 148\% \text{ (43-3)}$$

$$\text{Gases de combustión} = 373/0,063 = 5921 \text{ m}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 5921 \text{ m}^3 \text{ (43-4)}$$

EJERCICIO N° 44 (9)

Una mezcla de calcopirita (CuFeS_2), pirita (FeS_2) y calcosita (Cu_2S) analiza Cu 30%, Fe=30%, S=40%.

PREGUNTAS

1. Calcular el análisis mineralógico.

SOLUCION

1.

El cálculo del análisis mineralógico, consiste en determinar la composición de la mezcla en función de las especies minerales. Para ello, la composición elemental dada la distribuiremos entre los compuestos correspondientes. Veamos:

Pesos atómicos:

$$\text{Cu} = 64, \text{Fe} = 56, \text{S} = 32$$

Pesos moleculares:

$$\text{CuFeS}_2 = 184$$

$$\text{Cu}_2\text{S} = 160$$

$$\text{FeS}_2 = 120$$

Primero calculamos la composición elemental de cada compuesto:

Contenido de en CuFeS_2 :

$$\text{Cu} = (64/184) \cdot 100 = 34,78\%$$

$$\text{Fe} = (56/184) \cdot 100 = 30,44\%$$

$$\text{S} = 100 - 34,78 - 30,44 = 34,78\%$$

Contenido de en Cu_2S :

$$\text{Cu} = (64 \times 2 / 160) \times 100 = 80\%$$

$$\text{S} = 100 - 80 = 20\%$$

Contenido de en FeS_2 :

$$\text{Fe} = (56/120) \times 100 = 46,67\%$$

$$\text{S} = (2 \times 32 / 120) \times 100 = 53,33\%$$

Sea

$$X = \text{CuFeS}_2$$

$$Y = \text{FeS}_2$$

$$Z = \text{Cu}_2\text{S}$$

Ecuaciones:

$$(1) \quad \text{S: } 40 = 0,3478X + 0,5333Y + 0,20Z$$

$$(2) \quad \text{Cu: } 30 = 0,3478X + 0,80Z$$

$$(3) \quad \text{Fe: } 30 = 0,3044X + 0,4667Y$$

Al resolver este sistema de ecuaciones da los siguientes resultados

$$X = 19,5\%, Y = 51,5\%, Z = 29\%$$

Análisis mineralógico (44-1) $\text{CuFeS}_2 = 19,5\%$ $\text{FeS}_2 = 51,5\%$ $\text{Cu}_2\text{S} = 29,0\%$

CAPITULO IV
COMBUSTIBLES Y COMBUSTION

EJERCICIO N° 1 (7)

Un horno utilizado para fundir bronce, usa coque como combustible. La composición del coque es la siguiente:

C	82%
H	4
H ₂ O	2
Residuo	12

Las cenizas del horno suman el 15% del peso del coque. Se utiliza un 60% mas del aire requerido teóricamente por la combustión.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teóricamente requeridos para la combustión de 1 Kg. de coque. Calculado por el método del peso.
2. El volumen de aire real utilizado por kilogramo de coque.
3. El volumen de los productos de combustión, cuando se utilizan solamente los requerimientos de aire teórico. Calcular por el método del peso y cambiar a volumen.
4. El volumen y composición (%) de los productos de combustión (incluyendo el aire exceso). Calculado directamente por el método del volumen.

SOLUCION

1.

Es necesario antes que todo, establecer algunos datos básicos que se utilizarán en la resolución de este tipo de problemas.

COMPOSICION DEL AIRE

Gas	Por volumen	Por peso
	(%)	(%)
Oxigeno	21,0	23,2
Nitrogeno	79,0	76,8
Aire seco	100,0	100,0

En condiciones normales, 1 m³ de aire pesa 1,293 Kg.

En condiciones normales, 1 ft³ de aire pesa 0,0807 lb.

Peso molecular del aire = 29.

La parte de un combustible sólido que no es combustible, se denomina "residuo" (r), y esta compuesta por SiO₂, Al₂O₃, CaO y otras materias inorgánicas.

También existen algunas partículas que siendo combustibles, escapan mecánicamente de la combustión y todas ellas, cualquiera sea su naturaleza se asume que son carbono y se denominan "carbono sin quemar" (U.C). este carbono sin quemar, para efectos de cálculos hay que deducirlo del C total del combustible.

El residuo y el carbono sin quemar forman lo que se denomina "cenizas" por tanto

$$\text{Cenizas} = \text{Residuo (R)} + \text{Carbono sin quemar (U.C).} \quad (1)$$

En la composición del coque del ejercicio existen dos elementos combustibles que son el C y el H. Ellos realizan las siguientes reacciones de combustión:



Salvo que se diga lo contrario, siempre se considera que los elementos combustibles realizan combustión completa, por ejemplo, el C produce CO₂ y nada de CO en la combustión. El H₂ va a producir agua.

Para calcular el aire teóricamente requerido, necesitamos determinar el oxígeno que consumen las reacciones (1) y (2), para con la ayuda de la tabla propuesta al principio transformar este oxígeno en aire.

El C de la reacción (1) no es todo el de la composición, pues una parte se va con las cenizas, pero para realizar su cálculo utilizaremos la ecuación (1).

$$\text{Cenizas} = (R) + U.C$$

Cenizas = 15% del peso del carbon

Residuo = 12% del carbón

$$15\% = 12\% + U.C$$

$$U.C = 15 - 12 = 3\%$$

Como estamos tratando 1 Kg. de coque, si C = carbono de la reacción (1)

$$C = 0.82 - 0.03 = 0.79 \text{ Kg.}$$

Cálculo del oxígeno:

Dado que los pesos atomicos son C 12 H 1, O 16 hagamos la siguiente regla de tres

Reacción (1):

$$\begin{array}{ccc} \frac{C}{12} & \rightarrow & \frac{O}{32} \\ 0.79 & \rightarrow & x \end{array}$$

$$x = O(\text{reacción 1}) = 0.79 \cdot (32/12) = 2.106 \text{ Kg.}$$

$$O(\text{reacción 2}) = 0.04 \cdot (16/2) = 0.32 \text{ Kg.}$$

El oxígeno consumido por las reacciones se denomina "teórico", y el aire calculado a partir de él también será teórico.

$$O \text{ teórico} = 2.106 + 0.32 = 2.426 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire teórico} = 2.426 / 0.232 = 10.46 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire teórico} = 10.46 \text{ Kg.} (1 \text{ m}^3 = 1.293 \text{ Kg.}) = 8.09 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 8.09 \text{ m}^3 (1-1)$$

Debido a que el oxígeno fue calculado primero en peso y luego trasladado a volumen, este método se denomina "Método del Peso".

2.

El aire exceso es una cantidad adicional al de las reacciones para garantizar que la reacción sea completa y se expresa como un (%) del aire teórico. Sin él, la reacción será incompleta y se producirá también CO y otros gases.

El aire real es la suma de teórico más el exceso, por tanto, si el teórico es el 100% y el exceso es el 60%, el real será el 160%. Veamos la siguiente regla de tres:

$$\begin{array}{ccc} \frac{\text{m}^3}{8.09} & = & \frac{\%}{100} \\ x & & 160 \end{array}$$

$$\text{Aire real} = \text{aire total} = x = 8.09 \cdot (160/100) = 8.09 \times 1.6 = 12.94 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 12.94 \text{ m}^3 (1-2)$$

3.

Los productos de combustión están compuestos por todos los gases que quedan después de que ocurren las reacciones de combustión. En este caso, trataremos la reacción idealmente, es decir sin el aire en exceso, por tanto:

$$\text{Productos de combustión} = N_2(\text{aire teórico}) + CO_2(\text{reacción 1}) + H_2O(\text{reacción 2}) + H_2O$$

(coque)

Pesos moleculares

$$CO_2 = 44, H_2O = 18, N_2 = 28$$

Una mol de gas (Kg.) a C.N ocupa 22.4 m³.

$$\text{Peso del } CO_2 = 0.79 \times (44/12) = 2.89 \text{ Kg.}$$

$$\text{Volumen de } CO_2 = 2.89 \cdot (22.4/44) = 1.471 \text{ m}^3$$

$$H_2O(\text{reacción 2}) = 0.04 \cdot (18/2) \cdot (22.4/18) = 0.448 \text{ m}^3$$

$$H_2O(\text{coque}) = 0.02 \cdot (22.4/18) = 0.025 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ total} = 0.448 + 0.025 = 0.473 \text{ m}^3$$

$$N_2(\text{aire teórico}) = 10.46 - 2.43 = 8.03 \text{ Kg.}$$

$$N_2(\text{aire teórico}) = 8.03 \cdot (22.4/28) = 6.424 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de los gases} = 6.424 + 1.471 + 0.473 = 8.368 \text{ m}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 8.368 \text{ m}^3 (1-3)$$

4.

Hay que decir que de la única manera que aparece el O_2 en los productos de combustión, es cuando se ha introducido aire en exceso, en este caso, los productos de combustión (P.C) serán.

$$P.C = N_2(\text{aire teórico}) + N_2(\text{aire exceso}) + O_2(\text{aire exceso}) + H_2O \text{ total} + CO_2(\text{reacción 1})$$

$$\text{Aire exceso} = \text{aire total} - \text{aire teórico}$$

$$\text{Aire exceso} = 12,94 - 8,09 = 4,85 \text{ m}^3$$

$$\text{Productos de combustión con aire exceso} = 8,368 + 4,85 = 13,218 \text{ m}^3 \text{ (1-4)}$$

$$N_2 \text{ exceso} = 4,85 \times 0,79 = 3,83 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ total} = 6,42 + 3,83 = 10,25 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire exceso} = 4,85 - 3,83 = 1,02 \text{ m}^3$$

Composición del gas (1-4):

$$CO_2 = 1,471 \text{ m}^3 = 11,13\%$$

$$H_2O = 0,473 \text{ m}^3 = 3,58\%$$

$$O_2 = 1,020 \text{ m}^3 = 7,72\%$$

$$N_2 = 10,25 \text{ m}^3 = 77,57\%$$

$$13,214 \quad 100,0\%$$

EJERCICIO N° 2 (7)

Un horno para fundición quema carbon pulverizado de la siguiente composición

C	76,0%	S	1,2%
H	4,9	H ₂ O	1,5
O	7,8	R	6,9
N	1,7		

A los quemadores se les suministra 30% más de aire que el teóricamente requerido para la combustión completa del carbon.

PREGUNTAS

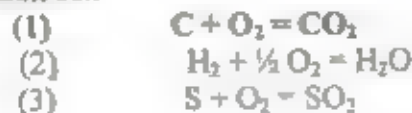
1. Cuantos kilogramos de aire se suministran por kilogramo de carbon?
2. Los metros cubicos de aire por kilogramo de carbon, calculados a partir de los requerimientos de la pregunta 1 y también directamente por el método del volumen.
3. Los pies cubicos de aire por libra de carbon.
4. El peso total de los productos de combustión por kilogramo de carbon.
5. El total de metros cubicos de los productos de combustión por kilogramo de combustible. Utilizar el método directo del volumen.
6. Por libra de carbon, los pies cubicos de productos de combustión.

SOLUCION

1

Los elementos combustibles en este carbon son: C, H y S

Las reacciones de combustión son



Pesos atómicos:

$$C=12, O=16, H=1, N=14, S=32$$

Pesos moleculares:

$$H_2O = 18$$

$$SO_2 = 64$$

Cálculo del oxígeno de las reacciones:

$$\text{En (1): } O \text{ del } C = 0,67(32/12) = 2,026 \text{ Kg.}$$

$$\text{En (2): } O \text{ del } H = 0,049(16/2) = 0,392 \text{ Kg.}$$

$$\text{En (3): } O \text{ del } S = 0,012(32/32) = 0,012 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total O de reacciones} = 2,206 + 0,392 + 0,012 = 2,43 \text{ Kg.}$$

El aire no suministra todo el oxígeno que necesitan las reacciones puesto que el carbón tiene una parte que habrá que restársela al total para poder determinar lo que suministra el aire

$$\text{O del carbón} = 0,078 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del aire teórico} = 2,43 - 0,078 = 2,352 \text{ Kg.}$$

El aire total es el teórico (100%) + el exceso (30%) = 130% En estas mismas proporciones está el oxígeno del aire.

$$\text{O total} = 2,352 \times 1,3 = 3,058 \text{ Kg.}$$

Dado que de acuerdo a la tabla del ejercicio anterior, el aire posee 23,2% de oxígeno en peso

$$\text{Aire total} = 3,058 / 0,232 = 13,18 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire total requerido} = 13,19 \text{ Kg. (2-1)}$$

2.

a.

Recordar que 1 m³ de aire pesa 1,293 Kg.

De acuerdo a (2-1):

$$\text{Aire} = 13,19 / 1,293 = 10,19 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 10,19 \text{ m}^3 \text{ (2-2.a)}$$

b. Método del Volumen:

Recordar que a C.N., una mol de gas (Kg.) ocupa 22,4 m³.

Cálculo del O₂:

$$\text{O}_2 \text{ del C} = 0,76 \cdot (22,4 / 12) = 1,418 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del H} = 0,049 \cdot (11,2 / 2) = 0,274 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del S} = 0,012 \cdot (22,4 / 32) = 0,0084 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del carbón} = 0,078 \cdot (22,4 / 32) = 0,0546 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ teórico} = 1,418 + 0,274 + 0,0084 + 0,0546 = 1,646 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ total} = 1,646 \times 1,3 = 2,14 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 2,14 / 0,21 = 10,19 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 10,19 \text{ m}^3 \text{ (2-2.b)}$$

3.

Recordar que a C.N., una libra-mol de gas ocupa 359 ft³.

Cálculo del oxígeno:

$$\text{O}_2 \text{ del C} = 0,76 \cdot (359 / 12) = 22,736 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del H} = 0,049 \cdot (359 / 4) = 4,397 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del S} = 0,012 \cdot (359 / 32) = 0,135 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del carbón} = 0,078 \cdot (359 / 32) = 0,875 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ teórico} = 22,736 + 4,397 + 0,135 + 0,875 = 26,393 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ total} = 26,393 \cdot (130 / 100) = 34,31 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 34,31 / 0,21 = 163,3 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 163,3 \text{ ft}^3 \text{ (2-3)}$$

4.

Cálculo de los productos de combustión (P.C):

$$\text{P.C} = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{O}(\text{reacción}) + \text{H}_2\text{O}(\text{combustible})$$

$$\text{N}_2 = \text{N}_2(\text{aire}) + \text{N}_2(\text{combustible})$$

O₂ = del aire exceso.

$$\text{CO}_2 = 0,76 \cdot (44 / 12) = 2,786 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O}(\text{reacción}) = 0,049 \cdot (18 / 2) = 0,441 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O}(\text{combustible}) = 0,015 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O total} = 0,441 + 0,015 = 0,456 \text{ Kg.}$$

$$\text{SO}_2 = 0,012 \cdot (64 / 32) = 0,024 \text{ Kg.}$$

$$\text{N}_2(\text{comb.}) = 0,017 \text{ Kg.}$$

$$\text{N}_2(\text{aire}) = 13,19 - 3,058 = 10,122 \text{ Kg.}$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 10,122 + 0,017 = 10,139 \text{ Kg.}$$

$$O_2 \text{ exceso} = 3,058 - 2,352 = 0,692 \text{ Kg.}$$

$$P.C. = 2,786 + 0,456 + 0,024 + 10,139 + 0,692 = 14,094 \text{ Kg.}$$

$$\text{Productos de combustión} = 14,094 \text{ Kg. (2-4)}$$

5

$$CO_2 = 0,76 \cdot (22,4/12) = 1,418 \text{ m}^3$$

$$H_2O(\text{reacción}) = 0,274 \times 2 = 0,548 \text{ m}^3$$

$$H_2O(\text{comb.}) = 0,015 \cdot (22,4/18) = 0,019 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ total} = 0,548 + 0,019 = 0,567 \text{ m}^3$$

$$SO_2 = 0,008 \text{ m}^3$$

$$N_2(\text{comb.}) = 0,017 \cdot (22,4/28) = 0,0136 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ del aire} = 10,19 - 2,14 = 8,05 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ total} = 8,064 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ exceso} = 2,14 - 1,65 = 0,49 \text{ m}^3$$

$$\text{Total productos de combustión} = 10,50 \text{ m}^3 \text{ (2-5)}$$

6

Sobre la base de los datos de la respuesta (3.):

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 22,736 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 2 O_2 \text{ del H} = 4,397 \times 2 = 8,794 \text{ ft}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,135 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ exceso} = 26,393 \times 0,3 = 7,918 \text{ ft}^3$$

$$= 34,31 - 26,393$$

$$N_2 = 0,017 \cdot (359/28) + 163,3 \times 0,79 = 129,225 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total productos de combustión} = 22,736 + 8,794 + 0,135 + 7,918 + 129,225 = 168,803 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total P.C.} = 169 \text{ ft}^3 \text{ (2-6)}$$

EJERCICIO N° 3 (7)

Una muestra de carbón presenta la siguiente composición:

C	87,43%
H	2,26
O	0,54
H ₂ O	8,21
R	1,56

Este carbón es quemado con 20% de aire en exceso. El aire se encuentra a 15°C y la presión barométrica es de 748 mm-Hg, asumido seco.

Las cenizas del horno equivalen a 2% del peso del carbon

PREGUNTAS

1. El volumen de aire, en pies cubicos a condiciones normales, que es teóricamente requerido para quemar 1 libra de carbón, calculado por el metodo del peso
2. Lo anterior, pero calculado por el metodo directo del volumen
3. El volumen de aire realmente usado, a las condiciones dadas
4. El peso del aire utilizado, en libras.
5. El volumen y composición, (%), de los productos de combustión
6. El peso de los productos de combustión.

SOLUCION

1.

Elementos combustibles: C y H

Reacciones de combustión:



Recordando la ecuación (1):

Si: R = residuo y U.C = carbono sin quemar:

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$2 = 1,56 + U.C$$

$$U.C = 2 - 1,56 = 0,44\%$$

$$\text{Carbono quemado} = 87,43 - 0,44 = 86,99\%$$

Base = 1 libra de carbón

Cálculo del oxígeno de las reacciones:

$$\begin{aligned}
 O \text{ del C} &= 0,8699 \cdot (32/12) = 2,3191 \text{ lb} \\
 O \text{ del H} &= 0,0226 \cdot (16/2) = 0,1808 \text{ lb} \\
 O \text{ del combustible} &= 0,0054 \text{ lb} \\
 O \text{ del aire teórico} &= 2,3197 + 0,1808 - 0,0054 = 2,4951 \text{ lb} \\
 \text{Aire teórico} &= 2,4952/0,23 = 10,848 \text{ lb} \\
 1 \text{ ft}^3 \text{ de aire pesa } &0,0807 \text{ lbs. A.C.N.} \\
 \text{Aire teórico} &= 10,848/0,0807 = 134 \text{ ft}^3 \\
 \text{Aire teórico} &= 134 \text{ ft}^3 \text{ (3-1)}
 \end{aligned}$$

2.
Método del Volumen.

$$\begin{aligned}
 O_2 \text{ del C} &= 0,8699 \cdot (359/12) = 26,0245 \text{ ft}^3 \\
 O_2 \text{ del H} &= 0,0226 \cdot (359/4) = 2,02835 \text{ ft}^3 \\
 O_2 \text{ del carbón} &= 0,0054 \cdot (359/32) = 0,06058 \text{ ft}^3 \\
 O_2 \text{ teórico} &= 26,0245 + 2,02835 + 0,06058 = 27,99227 \text{ ft}^3 \\
 \text{Aire teórico} &= 27,99227/0,21 = 133 \text{ ft}^3 \\
 \text{Aire teórico} &= 133 \text{ ft}^3 \text{ (3-2)}
 \end{aligned}$$

3.
Hay un 20% de aire exceso, por tanto:
Aire total = $133 \times 1,2 = 159,6 \text{ ft}^3 \text{ a C.N.}$
 $1 \text{ ft}^3 = 0,02832 \text{ m}^3$

$$\text{Aire total} = 159,6 \times 0,02832 = 4,52 \text{ m}^3 \text{ a C.N.}$$

Pasamos a las condiciones dadas.

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 748 \text{ mm} \\
 T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 15 + 273 = 288 \text{ K} \\
 V_1 &= 4,52 \text{ m}^3 & V_2 &=?
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= 4,52 \times (760/273) \cdot (288/748) = 4,84 \text{ m}^3 = 170,9 \text{ ft}^3 \\
 \text{Aire total a condiciones dadas} &= 170,9 \text{ ft}^3 = 4,84 \text{ m}^3 \text{ (3-3)}
 \end{aligned}$$

4

$$\begin{aligned}
 \text{Aire teórico} &= 10,848 \text{ lb (C.N)} \\
 \text{Aire total} &= 10,848 \times 1,2 = 13,01 \text{ lb} \\
 \text{Peso del aire} &= 13,01 \text{ lbs. (3-4)}
 \end{aligned}$$

5

Productos de combustión = P.C:



$$\begin{aligned}
 CO_2 &= 0,8699 \cdot (359/12) = 26,0245 \text{ ft}^3 \\
 H_2O(\text{reacción}) &= 2,02835 \times 2 = 4,0567 \text{ ft}^3 \\
 H_2O(\text{comb.}) &= 0,0821 \cdot (359/18) = 1,6375 \text{ ft}^3 \\
 \text{Total } H_2O &= 4,0567 + 1,6375 = 5,6942 \text{ ft}^3 \\
 \text{Aire total} &= 159,60 \text{ ft}^3 \\
 N_2 &= 159,60 \times 0,79 = 126,084 \text{ ft}^3 \\
 \text{Aire exceso} &= 159,6 - 133 = 26,6 \text{ ft}^3 \\
 O_2 \text{ de exceso} &= 26,6 \times 0,21 = 5,586 \text{ ft}^3 \\
 P.C \text{ total} &= 26,0245 + 5,6942 + 126,084 + 5,586 = 163,40 \text{ ft}^3
 \end{aligned}$$

Volumen de P.C = $163,40 \text{ ft}^3 \text{ (3-5)}$

Composición de los productos de combustión (3-5)

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= 15,9\% \\
 H_2O &= 3,5\% \\
 N_2 &= 77,2\% \\
 O_2 &= 3,1\%
 \end{aligned}$$

6

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= 0,8699 \cdot (44/12) = 3,19 \text{ lb} \\
 H_2O &= 0,0226 \cdot (18/2) + 0,0821 = 0,2855 \text{ lb} \\
 N_2 &= 126,084 \cdot (28/359) = 9,833 \text{ lb} \\
 O_2 &= 5,586 \cdot (32/359) = 0,498 \text{ lb} \\
 P.C &= 3,19 + 0,2855 + 9,833 + 0,498 = 13,8065 \text{ lb}
 \end{aligned}$$

Peso de los P.C = $13,81 \text{ lb. (3-6)}$

EJERCICIO N° 4 (7)

Un horno metalurgico utiliza carbón bituminoso de la siguiente composición.

C	72,2%	O	7,8%
H	5,0	S	0,8
N	1,7	R	12,5

1/4 de las cenizas son carbono sin quemar. El aire afuera se encuentra a 22°C y 751 mm de presión barométrica. Se utiliza 50% de aire en exceso.

PREGUNTAS

1. Los pies cubicos de aire (C.N) que son teóricamente requeridos, para quemar 1 libra de carbón.
2. Los pies cubicos de aire realmente usado a las condiciones dadas
3. El volumen de los productos de combustión en pies cubicos, y su composición en porcentaje
4. Los metros cubicos de aire realmente utilizado (C.N), por kilogramo de carbón
5. El volumen de los productos de combustión en metros cubicos y su composición en porcentajes.

SOLUCION

$$\begin{aligned} \text{Cenizas} &= R + U.C \\ 44 &= 24 + 64 \end{aligned}$$

Hagamos la siguiente regla de tres

$$12,5 \rightarrow 0,75(3/4)$$

$$x \rightarrow 0,25(1/4)$$

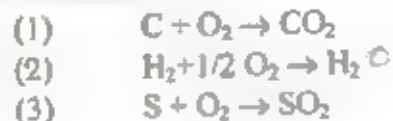
$$x = U.C = 0,25 \times 12,5 / 0,75 = 4,2\%$$

U.C = carbono sin quemar y R = residuo.

$$\text{Carbono quemado} = 0,722 - 0,042 = 0,68 \text{ lbs.}$$

Elementos combustible: C, H y S.

Reacciones de combustión.



Cálculo del oxígeno teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,68 \cdot (359/12) = 20,343 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,05 \cdot (359/4) = 4,487 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 0,008 \cdot (359/32) = 0,0897 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,078 \cdot (359/32) = 0,875 \text{ ft}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico}) = 20,343 + 4,487 + 0,0897 + 0,875 = 24,0447 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 24,0447 / 0,21 = 114 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico (C.N)} = 114 \text{ ft}^3 (4-1)$$

2.

$$\text{Recordar que } 1 \text{ ft}^3 = 0,0283 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 144 \times 1,5 = 171,0 \text{ ft}^3 = 4,8393 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones:

$$V_1 = 171,0 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 751 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273K$$

$$T_2 = 273 + 22 = 295K$$

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 188 \text{ ft}^3 = 5,29 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen real del gas a condiciones dadas} = 188 \text{ ft}^3 (4-2)$$

3.

Productos de combustión (P.C):

$$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2(\text{exceso}).$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 20,343 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 2 O_2 \text{ del H} = 2 \times 4,487 = 8,974 \text{ ft}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,0897 \text{ ft}^3$$

$$N_2 \text{ del carbón} = 0,017 \cdot (359/28) = 0,22 \text{ ft}^3$$

$$\begin{aligned} N_2 \text{ del aire} &= 171 \times 0,79 = 135,09 \text{ ft}^3 \\ N_2 \text{ total} &= 0,22 + 135,09 = 135,31 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire exceso} &= 171 - 114 = 57 \text{ ft}^3 \\ O_2(\text{aire exceso}) &= 57 \times 0,21 = 11,97 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

El gas P.C. será (4-3)

$$\begin{aligned} CO_2 &= 20,343 \text{ ft}^3 = 11,51\% \\ H_2O &= 8,974 \text{ ft}^3 = 5,08 \\ SO_2 &= 0,089 \text{ ft}^3 = 0,05 \\ N_2 &= 135,31 \text{ ft}^3 = 76,58 \\ O_2 &= 11,97 \text{ ft}^3 = 6,78 \\ \text{Total } 176,6867 \text{ ft}^3 &= 100,00\% \end{aligned}$$

4.

Tomando como base 1 Kg. de carbón:

$$\begin{aligned} O_2 \text{ del C} &= 0,68 \cdot (22,4/12) = 1,27 \text{ m}^3 \\ O_2 \text{ del H} &= 0,05 \cdot (22,4/4) = 0,28 \text{ m}^3 \\ O_2 \text{ del S} &= 0,008 \cdot (22,4/32) = 0,0056 \text{ m}^3 \\ O_2 \text{ del carbón} &= 0,078 \cdot (22,4/32) = 0,0546 \text{ m}^3 \\ O_2(\text{aire teórico}) &= 1,27 + 0,28 + 0,0056 - 0,0546 = 1,501 \text{ m}^3 \\ O_2 \text{ total del aire} &= 1,501 \times 1,5 = 2,2515 \text{ m}^3 \\ \text{Aire total} &= 2,2515 / 0,21 = 10,72 \text{ m}^3 \\ \text{Total aire (C.N)} &= 10,72 \text{ m}^3 \text{ (4-4)} \end{aligned}$$

5.

P.C = $CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2(\text{aire exceso})$

$$\begin{aligned} N_2(\text{total}) &= 10,72 \times 0,79 + 0,017 \cdot (22,4/28) = 8,4824 \text{ m}^3 \\ O_2(\text{exceso}) &= 2,2515 - 1,501 = 0,7505 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Productos de combustión (4-5).

	Volumen (m ³)	Porcentaje
CO ₂	1,27	11,47
H ₂ O	0,56	5,06
SO ₂	0,0056	0,05
O ₂	0,7505	6,78
N ₂	8,4824	76,64
	11,0685	100,00

Se puede observar que la composición resultante de los productos de combustión es igual a la del punto # 3, salvo errores de redondeo.

EJERCICIO N°5 (7)

Un horno quema en 24 horas, 9 1/2 toneladas métricas del carbón siguiente

C	76,0%
H	4,5
O	12,5
H ₂ O	1,0
R	6,0

Se forman 980 Kg. de cenizas. El volumen total de los gases que salen del hogar en 24 horas es 228000 m³.

La temperatura medida en el hogar fue de 330°C y la presión de 725 mm Hg.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teórico, requerido para quemar el carbón a las condiciones normales.
2. El porcentaje de aire en exceso.

SOLUCION

1.

Peso total del carbón = 9500 Kg.

Este peso del carbón está distribuido así:

$$C = 9500 \times 0,76 = 7220,0 \text{ Kg.}$$

$$\begin{aligned}
 H &= 9500 \times 0,045 = 527,4 \text{ Kg.} \\
 O &= 9500 \times 0,125 = 1187,5 \text{ Kg.} \\
 H_2O &= 9500 \times 0,01 = 95,0 \text{ Kg.} \\
 R &= 9500 \times 0,06 = 570,0 \text{ Kg.}
 \end{aligned}$$

Los elementos combustibles son el C y el H.

Reacciones:



$$U.C = 980 - 570 = 410 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 7220 - 410 = 6810 \text{ Kg.}$$

Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 6810 \cdot (22,4/12) = 12712 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 427,5 \cdot (22,4/4) = 2394 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 1187,2 \cdot (22,4/32) = 831,25 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 12712 + 2394 - 831,25 = 14274,75 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 14274,75/0,21 = 67975 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico (C.N)} = 67975 \text{ m}^3 \text{ (5-1)}$$

2.

El aire exceso lo debemos calcular en base a los productos de combustión (P.C), así:



$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 12712 \text{ m}^3$$



$$H_2O \text{ total} = 2394 \times 2 + 95 \cdot (22,4/18) = 4960,20 \text{ m}^3$$

$$N_2(\text{aire teórico}) = 67975 \times 0,79 = 53700 \text{ m}^3$$

$$P.C \text{ total sin aire exceso} = 12712 + 1906 + 53700 = 71318 \text{ m}^3$$

Este cálculo de los P.C, se ha realizado a C.N, vamos a pasarlo a las condiciones dadas

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 725 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273K$$

$$T_2 = 273 + 330 = 603K$$

$$V_1 = 71318 \text{ m}^3$$

$$V_2 = ?$$

Aplicando la ley de los gases ideales:

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) \therefore$$

$$V_2 = 71318 \cdot (760/273) \cdot (603/725) = 165131 \text{ m}^3$$

Este volumen es a las condiciones reales, para poderlo comparar con el volumen de los productos de combustión.

$$\text{Aire exceso a condiciones dadas} = 228000 - 165131 = 62869 \text{ m}^3$$

Dado que el aire teórico fue calculado a C.N, el aire exceso debemos llevarlo a las mismas condiciones para poderlos comparar

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 725 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273K$$

$$T_2 = 603K$$

$$V_1 = ?$$

$$V_2 = 62869 \text{ m}^3$$

$$V_1 = 62869 \cdot (725/603) \cdot (273/760) = 27152 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 100 \cdot (27152/67975) = 39,94\%$$

$$\text{Aire exceso} = 40,0\% \text{ (5-2)}$$

EJERCICIO N°6 (7)

Una muestra de carbón tiene la siguiente composición:

C	73,9%	N	1,4%
H	4,8	H ₂ O	5,4
O	8,8	R	5,7

Cuando este carbón fue utilizado en un horno, las cenizas contenían 18% de carbono sin quemar (U.C), y analizados los gases productos de la combustión (P.C) contenían 12% de oxígeno libre, análisis seco.

PREGUNTAS

- 1 Los requerimientos de aire teórico, en pies cúbicos por libra de carbón
- 2 El volumen de aire realmente utilizado y el porcentaje de aire en exceso
- 3 La composición (%) de los productos de combustión totales, análisis húmedo

SOLUCION

1.

Elementos combustibles = C y H.

Reacciones de combustión:



Cálculo del C de la combustión

$$\text{Cenizas}(100\%) = R(82\%) + U.C(18\%)$$

$$R = 82\% \text{ de las cenizas} = 0,057 \text{ lbs}$$

$$U.C = 0,057 \times 18/82 = 0,0125 \text{ lbs}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,739 - 0,0125 = 0,7165 \text{ lbs}$$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,7265 \cdot (359/12) = 21,734 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,048 \cdot (359/4) = 4,308 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,088 \cdot (359/32) = 0,987 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ para aire teórico} = 21,734 + 4,308 + 0,987 = 25,055 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 25,055/0,21 = 119 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 119 \text{ ft}^3 (6-1)$$

2

La existencia de oxígeno en los productos de combustión es motivada por la presencia de aire exceso, de manera, que en base al oxígeno en los P.C (12%) podemos calcular el aire exceso

$$P.C(\text{secos}) = CO_2 + N_2(\text{sin aire exceso}) + \text{Aire exceso}$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 21,734 \text{ ft}^3$$

$$N_2(\text{teórico}) = 119 \times 0,79 = 94,01 \text{ ft}^3$$

$$N_2(\text{carbón}) = 0,014 \cdot (359/28) = 0,179 \text{ ft}^3$$

$$N_2(\text{total}) \text{ sin el del aire exceso} = 94,01 + 0,179 = 94,189 \text{ ft}^3$$

$$P.C \text{ secos sin aire exceso} = 21,734 + 94,189 = 115,923 \text{ ft}^3$$

$$O_2 = 12\% \text{ de los P.C secos}$$

$$\text{Aire exceso en los P.C secos} = 12/0,21 = 57,14\%$$

$$P.C \text{ secos sin aire exceso} = 100 - 57,14 = 42,86\%$$

$$\text{Aire exceso} = 116 \cdot (57,14/42,86) = 155 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 155 + 119 = 274 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total utilizado} = 274 \text{ ft}^3 (6-2)$$

$$\text{Aire exceso} = 100 \cdot (155/119) = 130$$

$$\text{Aire exceso} = 130\% (6-2)$$

3

$$P.C(\text{húmedos}) = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$$

$$H_2O = 2 \times 4,308 + 0,054 \times (359/18) = 9,693 \text{ ft}^3$$

$$N_2 \text{ total} = 274 \times 0,79 + 0,179 = 216,639 \text{ ft}^3$$

$$O_2(\text{exceso}) = 155 \times 0,21 = 32,55 \text{ ft}^3$$

Análisis de Productos de combustión húmedos (6-3)

	Volumen (ft ³)	Porcentaje
CO ₂	21,734	7,7
H ₂ O	9,693	3,4
N ₂	216,639	77,3
O ₂	32,55	11,6
	280,616	100,0

EJERCICIO N°7 (7)

Un carbón presenta el siguiente análisis:

C	53,76%	N	0,76%
H	4,44	H ₂ O	2,73
O	12,54	R	21,76
S	4,01		

Este carbón es quemado en un horno, usando 40% de aire en exceso. Las cenizas del horno tienen 25% de carbono sin quemar (U.C).

La temperatura del aire es de 18°C y su presión barométrica de 740 mm, asumir el aire

PREGUNTAS

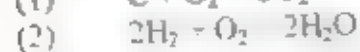
- 1 El volumen de aire teóricamente requerido para quemar 1 kilogramo de carbon, a condiciones normales.
- 2 El volumen del aire realmente utilizado, a condiciones dadas
- 3 La composición, (%), de los productos de combustion
- 4 Los gramos de la humedad llevada por cada metro cubico de los productos de combustion.

SOLUCION

1.

Los elementos combustible son: C, H y S.

Reacciones de combustion:



Cenizas (100%) = R (75%) + U.C (25%)

Como R = 0,2176 Kg., entonces

$$U.C = 0,2176 \cdot (25/75) = 0,0725 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ que reacciona} = 0,5376 - 0,0725 = 0,4651 \text{ Kg.}$$

Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,4651 \cdot (22,4/12) = 0,868 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,0444 \cdot (22,4/4) = 0,249 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 0,0401 \cdot (22,4/32) = 0,0281 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,1254 \cdot (22,4/32) = 0,0878 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico}) = 0,868 + 0,249 + 0,0281 + 0,0878 = 1,0573 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,0573 \cdot 0,21 = 5,04 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico (C.N)} = 5,04 \text{ m}^3 \text{ (7-1)}$$

2.

$$\text{Aire total a C.N} = 5,04 \times 1,4 = 7,056 \text{ m}^3$$

Este volumen se debe llevar a las condiciones dadas.

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 740 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 18 + 273 = 291 \text{ K}$$

$$V_1 = 7,056 \text{ m}^3$$

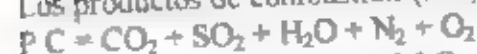
$$V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 7,72 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total del aire a condiciones dadas} = 7,72 \text{ m}^3 \text{ (7-2)}$$

3

Los productos de combustion (P.C), están compuestos así:

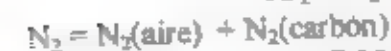


$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 0,868 \text{ m}^3$$



$$H_2O = 0,249 \times 2 + 0,0273 \cdot (22,4/18) = 0,532 \text{ m}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,0281 \text{ m}^3$$



$$N_2 = 7,056 \times 0,79 + 0,0076 \cdot (22,4/28) = 5,580 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire exceso}) = (7,056 - 5,04) \times 0,21 = 0,423 \text{ m}^3$$

Composición de los P.C (7-3)

Gas	Volumen (m ³)	Porcentaje
CO ₂	0,868	11,68
H ₂ O	0,532	7,16
SO ₂	0,0281	0,38
O ₂	0,423	5,69
N ₂	5,580	75,09
	7,431	100,00

4

$$P.C \text{ secos} = 7,431 - 0,532 = 6,899 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad} = 0,532 \cdot (18/22,4) = 0,4275 \text{ Kg.} = 427,5 \text{ g.}$$

$$\text{Humedad en gases secos} = 427,5/6,899 = 61,97$$

$$\text{Humedad en gases secos} = 61,97 \text{ g/m}^3 \text{ de gas (7-4)}$$

$$\text{Humedad en gases húmedos} = 427,5/7,431 = 57,53$$

$$\text{Humedad en gases húmedos} = 57,53 \text{ g/m}^3 \text{ de gas (7-4)}$$

EJERCICIO N°8 (7)

Un horno para aceros open-hearth, es calentado con un gas producido que analizó lo siguiente:

CO	24,4%	CH ₄	4,0%
CO ₂	4,9	N ₂	53,7
H ₂	10,2	H ₂ O	2,8

En la combustión se utilizó 10% de aire en exceso.

El aire y el gas entran a las puertas del horno a una temperatura de 500°C y 800 mm de

presión

Los productos de combustión (P.C) salen del horno a 1500°C y 750 mm de presión

PREGUNTAS

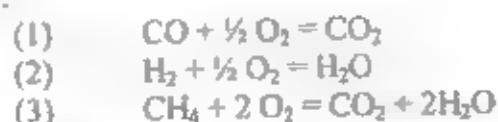
1. Por metro cúbico de gas a C.N., los metros cúbicos de aire utilizado.
2. Por pie cúbico de gas a condiciones dadas, los pies cúbicos de aire utilizado a condiciones dadas.
3. Por pie cúbico de gas a condiciones dadas, los pies cúbicos de aire medido a condiciones normales.
4. Por metro cúbico de gas a C.N., los metros cúbicos de productos de combustión (P.C) a C.N., y su composición en %.
5. Por metro cúbico de gas a C.N., los metros cúbicos del total de los productos de combustión, medidos a las condiciones bajo las cuales salen del horno.
6. Por pie cúbico de gas a condiciones dadas, el total de metros cúbicos de productos de combustión tal como salen del horno.

SOLUCION

1.

Los gases combustibles son: CO, H₂ y CH₄.

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$\text{O}_2 \text{ del CO(1)} = 0,244 \cdot (1/2) = 0,122 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del H}_2(2) = 0,102 \cdot (1/2) = 0,051 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del CH}_4(3) = 0,04 \times 2 = 0,08 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2(\text{aire teórico}) = 0,122 + 0,051 + 0,08 = 0,253 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 0,253/0,21 = 1,205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 1,205 \times 1,1 = 1,3255 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total a C.N} = 1,3255 \text{ m}^3 \text{ (8-1)}$$

2

Vamos a partir de 1 ft³ de gas a C.N. y llevaremos uno por uno los componentes a las condiciones dadas, para ver si cambia la composición, utilizando la ecuación de los gases ideales

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2):$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 800 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 500 = 773 \text{ K}$$

$$V_1 = \text{del compuesto (ft}^3\text{)} \quad V_2 = "$$

Calculando V₂ por sustitución en la ecuación, da los siguientes resultados

$$\text{Para el CO} = 0,6563 \text{ ft}^3 = 24,4\%$$

$$\text{Para el CO}_2 = 0,1318 \text{ ft}^3 = 4,9\%$$

$$\text{Para el H}_2 = 0,2744 \text{ ft}^3 = 10,2\%$$

$$\text{Para el CH}_4 = 0,1976 \text{ ft}^3 = 4,0\%$$

$$\text{Para el N}_2 = 1,4445 \text{ ft}^3 = 53,7\%$$

$$\text{Para el H}_2\text{O} = 0,0753 \text{ ft}^3 = 2,8\%$$

$$\frac{2,6899 \text{ ft}^3}{100,0\%}$$

Como puede verse, la composición del gas sigue igual. Al mismo valor total llegaríamos así, asumiendo directamente 1 ft³ de gas a C.N:

$$V_2 = 1 \cdot (760/273) \cdot (773/800) = 2,6899 \text{ ft}^3$$

Lo anterior quiere decir, que como las proporciones o composición de 1 ft³ de gas a C.N son iguales en condiciones dadas, el resultado será el mismo, en valor numérico que en la respuesta #1

$$\text{Aire utilizado a C.D} = 1,3255 \text{ ft}^3 \text{ (8-2)}$$

3.

1 ft³ de gas a C.D produce 1,3255 ft³ de aire a C.D. Este aire lo llevamos a C.N

$$V_1 = 1,3255 \cdot (273/760) \cdot (800/773) = 0,49 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire a C.N} = 0,49 \text{ ft}^3 \text{ por ft}^3 \text{ de gas a C.D (8-3)}$$

4.

$$P.C = CO_2 + N_2 + H_2O + O_2$$

$$CO_2 = CO_2 (\text{combustible} + \text{reacción 1} + \text{reacción 3})$$

$$CO_2 = 0,049 + 0,244 + 0,04 = 0,333 \text{ m}^3$$

$$N_2 = N_2 (\text{combustible} + \text{aire})$$

$$N_2 = 0,537 + 1,32 \times 0,79 = 1,580 \text{ m}^3$$

$$H_2O = H_2O (\text{combustible} + \text{reacción 2} + \text{reacción 3})$$

$$H_2O = 0,028 + 0,102 + 0,08 = 0,210 \text{ m}^3$$

$$O_2 (\text{aire exceso}) = (1,3255 - 1,205) \times 0,21 = 0,025 \text{ m}^3$$

Volumen y composición de los P.C a C.N (8-4)

Gas	Volumen (m ³)	Porcentajes
CO ₂	0,333	15,5
N ₂	1,580	73,6
H ₂ O	0,210	9,8
O ₂	0,025	1,2
	<u>2,148</u>	<u>100,0</u>

5.

En este caso:

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 750 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273K$$

$$T_2 = 1500 + 273 = 1773K$$

$$V_1 = 2,148 \text{ m}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = 2,148 \cdot (760/273) \cdot (1773/750) = 14,14 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C a condiciones dadas} = 14,14 \text{ m}^3 \text{ (8-5)}$$

6.

Productos de combustión a C.D, por ft³ de gas:

$$CO_2 = 0,049 + 0,244 + 0,04 = 0,333 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 0,028 + 0,102 + 2 \times 0,04 = 0,210 \text{ ft}^3$$

$$N_2 = 0,537 + 1,32 \times 0,79 = 1,580 \text{ ft}^3$$

$$O_2 = 0,21 \cdot (1,3255 - 1,205) = 0,025 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total P.C} = 2,148 \text{ ft}^3$$

En este caso

$$P_1 = 800 \text{ mm}$$

$$P_2 = 750 \text{ mm}$$

$$T_1 = 773K$$

$$T_2 = 1773K$$

$$V_1 = 2,148 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = 2,148 \cdot (800/773) \cdot (1773/750) = 5,255 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ ft}^3 = 0,0283 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,149 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C a condiciones de salida del horno, por ft}^3 \text{ de gas a C.D} = 0,149 \text{ m}^3 \text{ (8-6)}$$

EJERCICIO N°9 (7)

Una planta para zinc utiliza gas natural como combustible. El gas sale de las tuberías a 70°C y 940 mm de presión. El aire exterior está a 10°C, 720 mm de presión y es precalentado a 50°C antes de utilizarlo.

La composición del gas es la siguiente.

CH ₄	94,2%	CO	0,8%
C ₂ H ₄	0,8	CO ₂	0,4
O ₂	0,6	N ₂	3,2

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire utilizado para quemar 1 ft³ de gas, permitiendo un 10% de exceso y midiendo el gas a las condiciones como se obtiene de las tuberías, y el aire a las condiciones exteriores

2. La pregunta anterior, pero con el aire medido como precalentado

3. Los productos de combustión (P.C.), a condiciones normales por pie cúbico de gas a C.N.

4. Los productos de combustión a C.N., por pie cúbico de gas bajo las condiciones como se obtiene.

SOLUCION

1.

$$1 \text{ ft}^3 = 0,02832 \text{ m}^3$$

Gases combustibles en el gas de tuberías: CH₄, C₂H₄ y CO.

Reacciones:



$$\text{O}_2 \text{ del CH}_4 = 2 \text{CH}_4 = 2 \times 0,942 = 1,884 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del C}_2\text{H}_4 = 3 \text{C}_2\text{H}_4 = 3 \times 0,008 = 0,024 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del CO} = \frac{1}{2} \text{CO} = 1/2 \times 0,008 = 0,004 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del gas} = 0,006 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ teórico} = 1,884 + 0,024 + 0,004 - 0,006 = 1,906 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,906 / 0,21 = 9,07 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 9,07 \times 1,1 = 9,977 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 9,977 \text{ ft}^3 \times 0,028 = 0,279356 \text{ m}^3$$

Como se dice que el gas hay que tratarlo bajo las condiciones en que sale de las tuberías el cálculo del aire que acabamos de hacer es también bajo las mismas condiciones, pero se nos advierte que hay que considerarlo a las condiciones del medio exterior, por tanto habrá que llevarlo a esas condiciones.

$$P_1 = 940 \text{ mm}$$

$$P_2 = 720 \text{ mm}$$

$$T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad T_2 = 273 - 10 = 263 \text{ K}$$

$$V_1 = 9,977 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = 9,977 \cdot (940/293) \cdot (263/720) = 11,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total a las condiciones externas} = 11,7 \text{ ft}^3 \quad (9-1)$$

2.

En este caso

$$P_1 = 940 \text{ mm}$$

$$P_2 = 720 \text{ mm}$$

$$T_1 = 293 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 500 = 773 \text{ K}$$

$$V_1 = 9,977$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = 9,977 \cdot (940/293) \cdot (773/720) = 34,4 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total precalentado} = 34,4 \text{ ft}^3 \quad (9-2)$$

3.

$$\text{P.C. a C.N.} = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{CO}_2 = 0,004 + 0,942 + 0,016 + 0,008 = 0,970 \text{ ft}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,884 + 0,016 = 1,9 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 = 0,032 + 9,977 \times 0,79 = 7,914 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 = 0,006 + (9,977 - 9,07) \times 0,21 = 0,197 \text{ ft}^3$$

$$\text{P.C.} = 0,970 + 1,9 + 7,914 + 0,197 = 10,98 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total P.C. a C.N.} = 10,98 \quad (9-3)$$

4.

Los productos de combustión a las condiciones como se obtiene el gas, serían = 10,98 ft³, porque las proporciones no varían para 1 ft³ de gas.

Habría que llevarlo a C.N.

$$\begin{aligned} P_1 &= 940 \text{ mm} & P_2 &= 760 \text{ mm} \\ T_1 &= 293 \text{ K} & T_2 &= 273 \text{ K} \\ V_1 &= 10,98 \text{ ft}^3 & V_2 &=? \\ V_2 &= 10,98 \cdot (940/293) \cdot (273/760) = 12,65 \text{ ft}^3 \\ P.C. @ C.N. &= 12,65 \text{ ft}^3 \text{ (9-4)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°10 (7)

La composición de un combustible gaseoso es la siguiente:

H ₂	40%	CO	18%
CH ₄	22	O ₂	1
C ₂ H ₄	7	CO ₂	3
N ₂	4	H ₂ O	5

Para quemarlo, se suministra un 15% de aire en exceso del teóricamente requerido

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar un metro cúbico de gas.
2. Los metros cúbicos de los productos de combustión por metro cúbico de gas y su composición porcentual.
3. El peso en kilogramos de un metro cúbico de gas y de un metro cúbico de los productos de combustión.
4. El peso del aire utilizado para quemar un kilogramo de gas.
5. Los gramos de vapor de agua contenidos en un metro cúbico de gas y en un metro cúbico de los productos de combustión.

SOLUCION

1.

Los gases combustibles son: H₂, CH₄, C₂H₄ y CO.

Las reacciones con sus productos al igual que el O₂ consumido se muestran en el siguiente cuadro, para 1 m³ de gas quemado.

	O ₂ (m ³)	CO ₂ (m ³)	H ₂ O(m ³)
H ₂ + 1/2 O ₂ = H ₂ O	0,20	---	0,40
CH ₄ + 2 O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	0,44	0,22	0,44
C ₂ H ₄ + 3 O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	0,21	0,14	0,14
CO + 1/2 O ₂ = CO ₂	0,09	0,08	---
Totales	0,94	0,54	0,98

$$O_2 \text{ teórico} = 0,94 - 0,01 = 0,93 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 0,93/0,21 = 4,43 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 4,43 \times 1,15 = 5,09 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 5,09 \text{ m}^3 \text{ por m}^3 \text{ de gas (10-1)}$$

2.

$$P.C. = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$$

$$CO_2 \text{ total} = CO_2(\text{reacciones}) + CO_2(\text{combustible})$$

$$CO_2 \text{ total} = 0,54 + 0,03 = 0,57 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ total} = H_2O(\text{reacciones}) + H_2O(\text{combustible})$$

$$H_2O \text{ total} = 0,98 + 0,05 = 1,03 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ total} = N_2(\text{aire}) + N_2(\text{combustible})$$

$$N_2 \text{ total} = 5,09 \times 0,79 + 0,04 = 4,06 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{exceso}) = (5,09 - 4,43) \times 0,21 = 0,14 \text{ m}^3$$

Los productos de combustión, por m³ de gas son (10-2)

Gas	Volumen (m ³)	Composición (%)
CO ₂	0,57	9,8
H ₂ O	1,03	17,8
N ₂	4,06	70,0
O ₂	0,14	2,4
	5,80	100,0

3.

El peso en kilogramos de 1 m³ de gas:

$$H_2 = 0,4 \times (2/22,4) = 0,035 \text{ Kg.}$$

$$CH_4 = 0,22 \times (16/22,4) = 0,157 \text{ Kg.}$$

$$C_2H_4 = 0,07 \times (28/22,4) = 0,087 \text{ Kg.}$$

$$N_2 = 0,04 \times (28/22,4) = 0,05 \text{ Kg.}$$

$$CO = 0,18 \times (28/22,4) = 0,225 \text{ Kg.}$$

$$O_2 = 0,01 \times (32/22,4) = 0,014 \text{ Kg.}$$

$$CO_2 = 0,03 \times (44/22,4) = 0,059 \text{ Kg.}$$

$$H_2O = 0,05 \times (18/22,4) = 0,04 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso de 1 m}^3 \text{ de gas} = 0,035 + 0,157 + 0,087 + 0,05 + 0,225 + 0,014 + 0,059 + 0,04 = 0,67 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de 1 m}^3 \text{ de gas} = 0,67 \text{ Kg. (10-3)}$$

El peso de los P.C:

$$CO_2 = 0,098 \times (44/22,4) = 0,192 \text{ Kg.}$$

$$H_2O = 0,178 \times (18/22,4) = 0,143 \text{ Kg.}$$

$$N_2 = 0,7 \times (28/22,4) = 0,875 \text{ Kg.}$$

$$O_2 = 0,024 \times (32/22,4) = 0,034 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso de 1 m}^3 \text{ de P.C} = 0,192 + 0,143 + 0,875 + 0,034 = 1,24 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso de 1 m}^3 \text{ de productos de combustión} = 1,24 \text{ Kg. (10-3)}$$

4.

Debemos determinar que fracción de peso le corresponde a cada uno de los componentes del gas, si el peso de este es 1 Kg.

Si de 0,67 kg. de gas, al H le corresponden 0,035 Kg., de 1 Kg. de gas cuanto le corresponderá?

$$H_2 = 0,035/0,67 = 0,052 \text{ Kg.} \therefore O = 0,052 \times (16/2) = 0,416 \text{ Kg.}$$

$$CH_4 = 0,157/0,67 = 0,234 \text{ Kg.} \therefore O = 0,234 \times (64/16) = 0,936 \text{ Kg.}$$

$$C_2H_4 = 0,087/0,67 = 0,130 \text{ Kg.} \therefore O = 0,130 \times (96/28) = 0,445 \text{ Kg.}$$

$$CO = 0,225/0,67 = 0,336 \text{ Kg.} \therefore O = 0,336 \times (16/28) = 0,192 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ del gas} = 0,014/0,67 = 0,021 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ aire teórico} = 0,416 + 0,936 + 0,445 + 0,192 - 0,021 = 1,97 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire teórico} = 1,97/0,23 = 8,565 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire total} = 8,565 \times 1,15 = 9,85 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire necesario para quemar 1 Kg. de gas} = 9,85 \text{ Kg. (10-4)}$$

5.

$$H_2O \text{ en 1 m}^3 \text{ de gas} = 0,05 \times 18/22,4 = 0,04 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ en 1 m}^3 \text{ de gas} = 40 \text{ g. (10-5)}$$

$$H_2O \text{ en 1 m}^3 \text{ de P.C} = 0,178 \times 18/22,4 = 0,143 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ en 1 m}^3 \text{ de P.C} = 143 \text{ g. (10-5)}$$

EJERCICIO N°11 (7)

Un gas natural analizó lo siguiente:

CH ₄	82%
H ₂	4
CO	5
CO ₂	7
N ₂	2

El gas fluye de las tuberías a una temperatura de 8°C, presión de 820 mm y es quemado con aire que tiene una temperatura de 30°C, presión de 735 mm.
Los productos de combustión llevan 3% de oxígeno libre.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar 1 m³ de gas, ambos medidos a C.N. y el porcentaje de aire exceso utilizado.
2. la composición porcentual de los productos de combustión
3. Los m³ de aire utilizados para quemar 1 m³ de gas, ambos medidos a las condiciones reales
4. El peso de 1 m³ de gas, bajo sus condiciones reales.
5. Los kilogramos de aire utilizados para quemar 1000 m³ de gas, medido a sus condiciones reales.

SOLUCION

1.

Partimos de 1 m³ de gas a las condiciones en que sale de las tuberías. lo llevamos a las condiciones del aire con que va a reaccionar, y luego pasamos a C.N.

Condiciones del gas	Condiciones del aire
P ₁ = 820 mm	P ₂ = 735 mm
T ₁ = 265K	T ₂ = 303K
V ₁ = 1 m ³	V ₂ = ?

$$V_2 = 1 \cdot (820/265) \cdot (303/735) = 1,276 \text{ m}^3$$

A estas condiciones, el gas quedaría distribuido así:

$$\begin{aligned} \text{CH}_4 &= 1,276 \times 0,82 = 1,046 \text{ m}^3 \\ \text{H}_2 &= 1,276 \times 0,04 = 0,051 \text{ m}^3 \\ \text{CO} &= 1,276 \times 0,05 = 0,064 \text{ m}^3 \\ \text{CO}_2 &= 1,276 \times 0,07 = 0,089 \text{ m}^3 \\ \text{N}_2 &= 1,276 \times 0,02 = 0,026 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Reacciones de combustión	O ₂ (m ³)	CO ₂ (m ³)	H ₂ O (m ³)
CH ₄ + 2 O ₂ → 2 H ₂ O + CO ₂	2,0920	1,046	2,092
H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	0,0255	---	0,051
CO + 1/2 O ₂ → CO ₂	0,0320	0,064	---
Totales	2,1495	1,110	2,143

$$\text{Aire teórico} = 2,1495/0,21 = 10,24 \text{ m}^3$$

Los productos de combustión tienen 3% de O₂, lo cual equivale a una cantidad de aire en exceso:

$$\begin{aligned} \text{Aire exceso en P.C} &= 3/0,21 = 14,3\% \\ \text{P.C sin aire exceso} &= 100 - 14,3 = 85,7\% \\ \text{P.C sin aire exceso} &= \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2(\text{combustible} + \text{aire teórico}) \\ \text{CO}_2 &= 1,11 + 0,089 = 1,199 \text{ m}^3 \\ \text{N}_2 &= 0,026 + 10,24 \times 0,79 = 8,1156 \text{ m}^3 \\ \text{P.C sin aire exceso} &= 1,199 + 2,143 + 8,1156 = 11,4576 \text{ m}^3 \\ \text{Aire exceso} &= 11,4576 \times (14,3/85,7) = 1,912 \text{ m}^3 \\ \text{Aire total} &= 10,24 + 1,912 = 12,152 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Llevamos ahora este aire a C.N:

$$\begin{aligned} \text{Aire} &= 12,152 \cdot (735/303) \cdot (273/760) = 10,6 \text{ m}^3 \\ \text{Aire a C.N} &= 10,6 \text{ m}^3 (11-1) \end{aligned}$$

$$\text{Aire exceso} = 100 \times (1,912/10,24) = 18,7\%$$

$$\text{Aire exceso} = 18,7\% \text{ (11-1)}$$

2.

Los porcentajes de los productos de combustión se pueden calcular en cualquier estado en que se encuentre el gas (11-2)

	Volumen (m ³)	Composición (%)
O ₂ = 11,4576-(3/85,7)	0,401	3,0
N ₂ = 8,1156+1,912x0,79	9,626	72,0
CO ₂ =	1,199	9,0
H ₂ O	2,143	16,0
	13,369	100,0

3.

Este resultado se obtiene, utilizando el mismo procedimiento que se usó para la pregunta 1; es decir, calculando el aire a las condiciones reales del gas y llevar luego el resultado a las condiciones del aire. Debe dar como resultado = 12,152 m³ (11-3)

4.

A las condiciones dadas, 1 mol de gas ocupa el siguiente volumen

$$V = 22,4 \cdot (760/273) \cdot (265/820) = 20,15 \text{ m}^3$$

Dado que el peso molecular no varía con la temperatura:

$$\text{CH}_4 = 0,82 \cdot (16/20,15) = 0,651 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2 = 0,04 \cdot (2/20,15) = 0,004$$

$$\text{CO} = 0,05 \cdot (28/20,15) = 0,069$$

$$\text{CO}_2 = 0,07 \cdot (44/20,15) = 0,153$$

$$\text{N}_2 = 0,02 \cdot (28/20,15) = 0,028$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ gas a C.N pesa} = 0,905 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso de 1 m}^3 \text{ de gas a las condiciones reales} = 0,905 \text{ Kg. (11-4)}$$

5.

Cálculo del oxígeno:

$$\text{O del CH}_4 = 0,651 \times 1000 \times (2 \times 32/16) = 2604 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del H}_2 = 0,004 \times 1000 \times (16/2) = 32$$

$$\text{O del CO} = 0,069 \times 1000 \times (16/28) = 39,4$$

$$\text{O teórico} = 2604 + 32 + 39,4 = 2675,4 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire teórico} = 2675,4/0,232 = 11532 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire total} = 11532 \times 1,187 = 13688,5 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire a condiciones reales} = 13688,5 \text{ Kg. (11-5)}$$

EJERCICIO N°12 (7)

Un horno quema el siguiente carbon, utilizando 60% de aire en exceso.

C	74,6%	O	8,2%
H	4,6	H ₂ O	5,0
N	1,3	R	6,3

Analizadas las cenizas del horno, contenían 20% de carbono sin quemar. El aire utilizado está húmedo y lleva 22 gramos de vapor de agua por m³ de aire seco.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire seco teóricamente requeridos por kilogramo de carbon, en condiciones normales.
2. Los metros cúbicos de aire húmedo realmente usados a condiciones normales.
3. El volumen total de los productos de combustión.
4. Si la cantidad de humedad en el aire fuera 22 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire húmedo, ¿cuál sería el volumen de aire húmedo realmente utilizado para la combustión del carbón?

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona.

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$100 \quad 80 \quad 20$$

$$R = 0,063 \text{ Kg.}$$

$$U.C = 0,063 \cdot (20/100) = 0,016 \text{ Kg}$$

$$C \text{ que reacciona} = 0,746 - 0,016 = 0,73 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico.

$$O_2 \text{ del C} = 0,73 \times 22,4/12 = 1,362 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,046 \times 22,4/4 = 0,258 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,082 \times 22,4/32 = 0,0574 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 1,362 + 0,258 + 0,057 = 1,563 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,563/0,21 = 7,44 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 7,44 \text{ m}^3 \text{ (12-1)}$$

2.

$$\text{Aire total seco} = 7,44 \times 1,6 = 11,904 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor de agua} = 0,022 \text{ Kg./m}^3 \text{ de aire seco.}$$

$$\text{Vapor de agua} = 0,022 \times 22,4/18 = 0,0273 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de aire seco.}$$

$$\text{Humedad total} = 11,904 \times 0,0273 = 0,325 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 11,904 + 0,325 = 12,23 \text{ m}^3.$$

$$\text{Aire total húmedo C.N} = 12,23 \text{ m}^3 \text{ (12-2)}$$

3.

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2 \text{ exceso}$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,362 \text{ m}^3$$

$$H_2O = H_2O \text{ (carbón + aire + reacciones)}$$

$$H_2O = 0,05 \cdot (22,4/18) + 0,352 + 0,258 \times 2 = 0,903 \text{ m}^3$$

$$N_2 = N_2 \text{ (aire + carbón)}$$

$$N_2 = 0,013 \times 22,4/28 + 11,904 \times 0,79 = 9,414 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 11,904 - 7,44 = 4,464 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire exceso} = 4,464 \times 0,21 = 0,937 \text{ m}^3$$

$$P.C = 1,362 + 0,903 + 9,414 + 0,937 = 12,62 \text{ m}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 12,62 \text{ m}^3 \text{ (12-3)}$$

4.

$$\text{Aire húmedo} = 12,23 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad} = 12,23 \cdot (22/1000) \cdot (22,4/18) = 0,335 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 12,23 - 0,325 + 0,335 = 12,24 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 12,24 \text{ m}^3 \text{ (12-4)}$$

EJERCICIO N°13 (7)

Un carbón usado para calentar un horno de reverbero analizó lo siguiente

C	65,0%	N	2,0%
H	5,8	H ₂ O	4,8

$$\bullet \quad 10,2 \quad R \quad 12,2$$

Las cenizas del horno representaron el 15% del peso del carbón.

Para la combustión se suministró 75% de aire en exceso. El aire contenía 15 gramos de vapor de agua por cada metro cúbico de aire húmedo.

PREGUNTAS

1. los metros cúbicos de aire húmedo suministrados por kilogramo de carbón
2. Los gramos de vapor de agua contenidos en cada metro cúbico de los productos de combustión gaseosos.

SOLUCION

1.

Cálculo del carbono que reacciona:

Dado que el peso de las cenizas es 0,15 y el del residuo es 0,122 Kg por Kg de carbón entonces:

$$R = 0,122/0,15 = 0,8133 = 81,33\% \text{ de las cenizas.}$$

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$U.C = 100 - 81,33 = 18,67\% \text{ de las cenizas}$$

$$U.C = 0,15 \times 0,1867 = 0,028 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,65 - 0,028 = 0,622 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión.



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,622 \cdot (22,4/12) = 1,161 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,058 \cdot (22,4/4) = 0,325 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,102 \cdot (22,4/32) = 0,0714 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 1,161 + 0,325 - 0,0714 = 1,4146 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 1,4146/0,21 = 6,7362 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 6,7362 \times 1,75 = 11,7883 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor de agua} = 0,015 (22,4/18) = 0,0186 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de aire}$$

$$\text{Humedad del aire} = 11,7883 \times 0,0186 = 0,2193 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 11,7883 + 0,2193 = 12,0076 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 12,00 \text{ m}^3 \text{ por Kg. de carbón (13-1)}$$

2.

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2(\text{exceso}).$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,161 \text{ m}^3$$

$$H_2O = H_2O (\text{carbón} + \text{reacción} + \text{humedad aire})$$

$$H_2O = 0,048 \times 22,4/18 + 0,325 \times 2 + 0,22 = 0,93 \text{ m}^3$$

$$N_2 = N_2(\text{carbón} + \text{aire})$$

$$N_2 = 0,02 \times 22,4/28 + 11,7883 \times 0,79 = 9,3288 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso seco} = 11,7883 - 6,7362 = 5,0521 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ exceso} = 5,0521 \times 0,21 = 1,0609 \text{ m}^3$$

$$P.C = 1,161 + 0,93 + 9,3288 + 1,0609 = 12,4807 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor de agua} = 0,93 \times 18/22,4 = 0,747 \text{ Kg.} = 747 \text{ g.}$$

$$\text{Vapor de agua} = 747/12,4807 = 59,85$$

$$\text{Vapor de agua} = 60 \text{ g por m}^3 \text{ de P.C (13-2)}$$

EJERCICIO N°14 (7)

Un carbón bituminoso tiene la siguiente composición:

C	70,6%	N	1,4%
H	4,8	H ₂ O	4,6
O	8,6	R	10,0

Fue quemado con 75% de aire en exceso. Las cenizas del horno contenían 13,6% de carbono sin quemar.

El aire estaba a 15°C y 772 mm de presión barométrica, y llevaba 11,6 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire seco, medido a condiciones normales

PREGUNTAS

- 1 El volumen de aire seco teóricamente requerido por kilogramo de carbón, medido a condiciones dadas.
- 2 El volumen de aire húmedo realmente utilizado, y el porcentaje de humedad
- 3 El volumen de los productos de combustión, tal como ellos salen por la chimenea a la temperatura de 420°C.

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona:

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$100 = 86,4 + 13,6 \dots$$

$$U.C = 0,1 \cdot (13,6/86,4) = 0,016 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,706 - 0,016 = 0,69 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,69 (22,4/12) = 1,288 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,048 (22,4/4) = 0,267 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,086 (22,4/32) = 0,0602 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 1,288 + 0,267 - 0,06 = 1,495 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico a C.N} = 1,495/0,21 = 7,119 \text{ m}^3$$

Cambio a condiciones dadas:

$$\begin{aligned} P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 772 \text{ mm} \\ T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 288 \text{ K} \\ V_1 &= 7,119 \text{ m}^3 & V_2 &=? \\ V_2 &= 7,119 \cdot (760/273) \cdot (288/772) = 7,4 \text{ m}^3 \\ \text{Aire teórico a C.D} &= 7,40 \text{ m}^3 \quad (14-1) \end{aligned}$$

2

$$\begin{aligned} \text{Aire total seco (C.D)} &= 7,4 \times 1,75 = 12,95 \text{ m}^3 \\ \text{Humedad} &= 0,0116 \cdot (22,4/18) = 0,0144 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ aire seco} \\ \text{Total aire seco C.N} &= 7,12 \times 1,75 = 12,46 \text{ m}^3 \\ \text{Humedad total} &= 12,46 \times 0,0144 = 0,18 \text{ m}^3 \\ \text{Volumen aire húmedo realmente usado} &= 12,95 + 0,18 = 13,13 \text{ m}^3 \\ \text{Aire realmente usado C.D} &= 13,13 \text{ m}^3 \quad (14-2) \\ \text{Máxima presión de saturación de vapor de agua a } 15^\circ\text{C (tablas)} &= 12,8 \text{ mm} \\ \text{A esta le corresponde un volumen de} & \\ V(\text{H}_2\text{O}) &= 12,46 \times 12,8 / (772 - 12,8) = 0,21 \text{ m}^3 \\ \text{Saturación} &= 100 \cdot (0,18/0,21) = 85,7\% \\ \text{Porcentaje de humedad} &= \text{Saturación} = 85,7\% \quad (14-2) \end{aligned}$$

3

$$\begin{aligned} P.C &= \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2(\text{exceso}) \\ \text{CO}_2 &= \text{O}_2 \text{ del C} = 1,288 \text{ m}^3 \\ \text{H}_2\text{O} &= \text{H}_2\text{O (carbón + reacción + humedad aire)} \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,046 \cdot (22,4/18) + 0,267 \times 2 + 0,18 = 0,771 \text{ m}^3 \\ \text{N}_2 &= \text{N}_2(\text{carbón + aire}) \\ \text{N}_2 &= 0,014 \cdot (22,4/28) + 12,46 \times 0,79 = 9,8546 \text{ m}^3 \\ \text{Aire exceso} &= 12,46 - 7,119 = 5,341 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2(\text{aire exceso}) &= 5,341 \times 0,21 = 1,122 \text{ m}^3 \\ \text{Total P.C} &= 1,288 + 0,771 + 9,8546 + 1,122 = 13,0356 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pasamos a las condiciones de salida de los gases por la chimenea.

$$\begin{aligned} P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 772 \text{ mm} \\ T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 693 \text{ K} \\ V_1 &= 13,0356 \text{ m}^3 & V_2 &=? \\ V_2 &= 13,0356 \cdot (760/273) \cdot (693/772) = 32,6 \text{ m}^3 \\ \text{P.C tal como salen por la chimenea} &= 32,6 \text{ m}^3 \quad (14-3) \end{aligned}$$

EJERCICIO N°15 (7)

El análisis de un carbón es el siguiente:

C	72,4%	O	10,0%
N	1,8	H ₂ O	2,4
H	6,4	R	7,0

Cuando este carbón fue quemado en un horno, utilizando 80% de aire en exceso. Las cenizas promediaron 15% de carbono sin quemar.

El aire para la combustión tuvo 12 mm de vapor de agua, siendo la presión barométrica de 720 mm.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado (incluyendo el contenido de humedad) por kilogramo de carbón quemado.
2. El volumen y composición (%), de los productos de combustión.
3. El peso del aire húmedo y el peso total de los productos de combustión cuyos volúmenes fueron determinados en las respuestas 1 y 2.

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona.

Cenizas = R + U.C

100 = 85 + 15

$$U.C = 0,07 \cdot (15,85) = 0,0124 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,724 - 0,0124 = 0,712 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del O_2 del aire teórico seco:

$$O_2 \text{ del C} = 0,712 \cdot (22,4/12) = 1,329 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,064 \cdot (22,4/4) = 0,3584 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del combustible} = 0,1 \cdot (22,4/32) = 0,07 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico seco}) = 1,329 + 0,3584 + 0,07 = 1,6174 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 1,6174/0,21 = 7,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Total aire seco a C.N} = 7,7 \times 1,8 = 13,86 \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen de la humedad:

Los volúmenes y las presiones siempre están en la misma relación en la mezcla.

$$P_1 P_2 = V_1 V_2$$

$$V_2 = V_1 (P_2/P_1)$$

$$V_1 = \text{volumen de aire seco} = 13,86 \text{ m}^3$$

$$P_1 = \text{presión de aire seco} = 720 - 12 = 708 \text{ mm}$$

$$V_2 = \text{volumen de humedad} = ?$$

$$P_2 = \text{presión de la humedad} = 12 \text{ mm}$$

$$V_2 = 13,86 \cdot (12/708) = 0,23 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total de aire húmedo} = 13,86 + 0,23 = 14,09 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total húmedo} = 14,09 \text{ m}^3 \text{ (15-1)}$$

2.

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2(\text{aire exceso})$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,329 \text{ m}^3$$

$$H_2O = H_2O(\text{combustible} + \text{reacción} + \text{humedad aire})$$

$$H_2O = 0,23 + 2 \times 0,3584 + 0,024 \cdot (22,4/18) = 0,95 \text{ m}^3$$

$$N_2 = N_2(\text{carbón} + \text{aire})$$

$$N_2 = 0,018 \cdot (22,4/28) + 13,89 \times 0,79 = 10,964 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso seco} = 13,86 - 7,7 = 6,16 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire exceso}) = 6,16 \times 0,21 = 1,29 \text{ m}^3$$

Productos de combustión (15-2)

Gas	Volumen (m ³)	Composición (%)
CO ₂	1,33	9,1
H ₂ O	0,95	6,6
N ₂	10,97	75,4
O ₂	1,29	8,9
	14,94	100,0

3

$$\text{Densidad del aire} = 1,293 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Peso del aire seco} = 13,86 \times 1,293 = 17,92 \text{ Kg.}$$

$$\text{Un m}^3 \text{ de vapor de agua pesa } 0,8063 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del vapor de agua} = 0,23 \times 0,8063 = 0,19 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del aire húmedo} = 17,92 + 0,19 = 18,11 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso de aire húmedo} = 18,11 \text{ Kg. (15-3)}$$

$$\text{Densidad del CO}_2 = 1,977 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{Peso del CO}_2 = 1,977 \times 1,33 = 2,63 \text{ Kg.}$$

$$\text{Densidad del N}_2 = 1,251$$

$$\text{Peso del N}_2 = 1,251 \times 10,97 = 14,16 \text{ Kg.}$$

$$\text{Densidad del O}_2 = 1,429$$

$$\text{Peso del O}_2 = 1,429 \times 1,29 = 1,84 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso total del agua} = 0,95 \times 0,8063 = 0,77 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso total de los P.C} = 2,63 + 14,16 + 1,84 + 0,77 = 19,40 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total P.C} = 19,40 \text{ Kg. (15-3)}$$

EJERCICIO N°16 (7)

Un carbón de Pennsylvania presentó la siguiente composición.

C	80,3%	N	1,5%
H	4,9	H ₂ O	2,0
O	3,1	R	8,2

Cuando se uso este carbón en un horno, las cenizas totalizaron el 2,2% del peso del carbon

Se utilizo 30% de aire en exceso, y es aire estaba $\frac{3}{4}$ saturado con vapor de agua. La temperatura del aire fue de 15°C y el barometro marco 740 mm de presión

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire utilizado, medidos a C.N por libra de carbón.
2. Los pies cúbicos de aire utilizados bajo las condiciones reales.
3. El volumen de los productos de combustión y los granos de humedad llevada en ellos, por pie cúbico.

SOLUCION

1.

Cálculo del carbono que reacciona.

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$U.C = \text{cenizas} - R = 0,121 - 0,082 = 0,039 \text{ lbs.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,803 - 0,039 = 0,764 \text{ lbs.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,764 \cdot (359/12) = 22,856 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,049 \cdot (359/4) = 4,398 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,031 \cdot (359/32) = 0,348 \text{ ft}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico}) = 22,856 + 4,398 + 0,348 = 26,906 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 26,906/0,21 = 128,1 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total seco a C.N} = 128,1 \times 1,3 = 166 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total seco a C.N} = 166 \text{ ft}^3 \text{ (16-1)}$$

2.

Saturación del aire = $\frac{3}{4} = 75\%$

Presión máxima de vapor de agua a 15°C (tablas XXIV del Apéndice) = 12,8 mm

$$\text{Presión real del vapor de agua} = 12,8 \times 0,75 = 9,6 \text{ mm}$$

Barómetro = 740 mm

Vamos a llevar el aire a las condiciones reales:

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 740 - 9,6 = 730,4 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273K \quad T_2 = 273 + 15 = 288K$$

$$V_1 = 166 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 182 \text{ ft}^3$$

Volumen de aire a las condiciones reales = 182 ft³ (16-2)

3.

P.C = CO₂ + H₂O + N₂ + O₂(aire exceso)

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 22,856 \text{ ft}^3$$

H₂O = H₂O(carbón + reacción + humedad del aire)

$$H_2O = 0,02 \cdot (359/18) + 2 \times 4,398 + 166 (9,6/730,4) = 11,376 \text{ ft}^3$$

N₂ = N₂(carbón + aire)

$$N_2 = 0,015 \cdot (359/28) + 166 \times 0,79 = 131,332 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 166 - 128 = 38 \text{ ft}^3$$

$$O_2(\text{aire exceso}) = 38 \times 0,21 = 7,98 \text{ ft}^3$$

$$P.C = 22,856 + 11,376 + 131,332 + 7,98 = 174 \text{ ft}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 174 \text{ ft}^3 \text{ (16-3)}$$

Humedad en los P.C = 11,376 ft³

1 grano = 0,000143 libras = 0,0648 gramos

1 m³ de agua pesa 0,8063 Kg.

$$H_2O = 11,376 \times 0,028 = 0,32 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 0,32 \times 0,8063 = 0,258 \text{ Kg.} = 258 \text{ g.}$$

$$H_2O = 258 / 0,0648 = 3981 \text{ granos}$$

$$\text{Humedad en P.C} = 3981 / 174 = 23 \text{ granos/ft}^3$$

$$\text{Humedad en P.C} = 23 \text{ granos/ft}^3 \text{ (16-3)}$$

EJERCICIO N°17 (7)

Un carbón bituminoso utilizado en un horno de reverbero, analizó lo siguiente

C	75,4%	N	1,6%
H	6,6	H ₂ O	2,0
O	7,2	R	6,4
S	0,8		

Este carbón fue quemado en un horno con 60% de aire en exceso 4% del carbono contenido en el carbón se perdió sin quemar en las cenizas.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teórico requeridos por kilogramo de carbón, medidos a condiciones normales.
2. Los metros cúbicos de aire húmedo utilizados, si este estuviera ½ saturado con vapor de agua a 22°C y 740 mm de presión.
3. Los metros cúbicos de productos de combustión formados en este caso.
4. La composición (%) de los productos de combustión.
5. La presión parcial del vapor de agua en los productos de combustión

SOLUCION

1.

En esta oportunidad el U.C no viene vinculado ni a las cenizas ni al residuo, sino directamente al C del combustible.

$$U.C = 0,744 \times 0,04 = 0,0302 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,724 - 0,030 = 0,724 \text{ Kg.}$$

Los elementos combustibles son: C, H y S.

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,724 \cdot (22,4/12) = 1,351 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,066 \cdot (22,4/4) = 0,3696 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 0,008 \cdot (22,4/32) = 0,0056 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,072 \cdot (22,4/32) = 0,0504 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico}) = 1,351 + 0,3696 + 0,0056 + 0,0504 = 1,6758 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,6758 / 0,21 = 7,98 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico (C.N)} = 7,98 \text{ m}^3 \text{ por Kg. de carbón (17-1)}$$

2.

Saturación = ½ = 50%

Maxima presión de vapor de agua a 22°C (tablas XXIV del Apéndice) = 19,8 mm

Presión real del vapor de agua = 19,8 × 0,5 = 9,9 mm.

$$\text{Aire seco total} = 7,98 \times 1,6 = 12,77 \text{ m}^3$$

$$\text{Presión de aire seco} = 740 - 9,9 = 730,1 \text{ mm.}$$

Cambiamos a las condiciones dadas:

V₂ = Volumen de aire húmedo

V₁ = Volumen de aire seco = 12,77 m³

P₂ = presión de aire húmedo = 760 mm

$$P_1 = \text{presión de aire seco} = 730,1 \text{ mm}$$

$$T_2 = 273 \text{ K}$$

$$T_1 = 295 \text{ K}$$

$$V_2 = 12,77 \cdot (760/273) \cdot (295/730,1) = 14,36 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D} = 14,36 \text{ m}^3 \text{ (17-2)}$$

También se puede realizar el cálculo así:

En una mezcla de gases, las presiones parciales guardan la misma relación que los volúmenes

$$V_2/V_1 = P_2/P_1 \therefore$$

$$V_2 = V_1 \cdot (P_2/P_1)$$

$$V_2 = \text{volumen de humedad} = ?$$

$$V_1 = \text{volumen de aire seco} = 12,77 \text{ m}^3$$

$$P_2 = \text{presión parcial del agua} = 9,9 \text{ mm}$$

$$P_1 = \text{presión parcial del aire seco} = 740 - 9,9 = 730,1 \text{ mm}$$

$$V_2 = 12,77 \cdot (9,9/730,1) = 0,173 \text{ m}^3$$

Pasamos el aire seco a C.D.

$$V_2 = 12,77 \cdot (760/173) \cdot (295/740) = 14,172 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 14,172 + 0,173 = 14,35 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D} = 14,35 \text{ m}^3 \text{ (17-2)}$$

3.

$$P.C. = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{CO}_2 = \text{O}_2 \text{ del C} = 1,351 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 = (\text{carbón} + \text{reacción} + \text{humedad aire})$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,02 \times 22,4/18 + 2 \times 0,3696 + 0,173 = 0,9372 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = \text{N}_2(\text{carbón} + \text{aire})$$

$$\text{N}_2 = 0,016 \times 22,4/28 + 12,77 \times 0,79 = 10,1011 \text{ m}^3$$

$$\text{SO}_2 = \text{O}_2 \text{ del S} = 0,0056 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 12,77 - 7,98 = 4,79 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2(\text{aire exceso}) = 4,79 \times 0,21 = 1,0059 \text{ m}^3$$

$$P.C. = 1,351 + 0,9372 + 10,1011 + 0,0056 + 1,0059 = 13,40 \text{ m}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 13,40 \text{ m}^3 \text{ (17-3)}$$

4.

Composición de los productos de combustión (17-4)

Gas	Volumen (m ³)	Composición (%)
CO ₂	1,351	10,1
H ₂ O	0,9372	7,0
N ₂	10,1011	75,4
O ₂	1,0059	7,5
SO ₂	0,0056	0,04

5.

$$P = \sum X_i P_i$$

$$P_i = \text{presión parcial del componente "i"}$$

$$X_i = \text{fracción molar de "i"} = 0,07 \text{ (ver composición)}$$

$$P = \text{presión total de la mezcla} = 740 \text{ mm}$$

$$P_i = 0,07 \times 740 = 51,8 \text{ mm}$$

$$\text{Presión del vapor de agua en los P.C} = 51,8 \text{ mm (17.5)}$$

EJERCICIO N°18 (7)

Un horno para fusión de aluminio utilizó coque como combustible. La composición del coque fue la siguiente:

C	85%
H	1
H ₂ O	2
R	12

1/5 de las cenizas del horno eran carbono sin quemar

Por cada kilogramo de coque se utilizaron 12 m³ de aire húmedo medido a condiciones normales; llevando 20 mm de vapor de agua. Barómetro, 720 mm.

PREGUNTAS

1. El porcentaje de aire exceso utilizado.
2. El volumen total de los productos de combustión (húmedos), y el porcentaje de oxígeno libre en ellos.
3. Si los productos de combustión hubieran contenido 6% de oxígeno libre, análisis seco, ¿qué porcentaje de aire en exceso significaría esto?

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona:

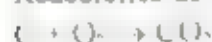
$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$\begin{array}{ccc} 5/5 & 4/5 & 1/5 \\ 100\% & 80\% & 20\% \end{array}$$

$$U.C = 0,12 \cdot (20/80) = 0,03 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,85 - 0,3 = 0,82 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,82 \times 22,4/12 = 1,53 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,01 \times 22,4/4 = 0,056 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico}) = 1,53 + 0,056 = 1,586 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,586/0,21 = 7,552 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad} = 12 \cdot (20/720) = 0,34 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 12 - 0,34 = 11,66 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 11,66 - 7,55 = 4,11 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 4,11 \times 100/7,55 = 54,4\%$$

$$\text{Aire exceso} = 54,4\% \text{ (18-1)}$$

2.



$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,53 \text{ m}^3$$

$$H_2O = H_2O(\text{carbón} + \text{reacción} + \text{humedad aire})$$

$$H_2O = 0,02 \cdot (22,4/18) + 2 \times 0,056 + 0,34 = 0,48 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 11,66 \times 0,79 = 9,211 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire exceso}) = 4,11 \times 0,21 = 0,863 \text{ m}^3$$

$$\text{Total P.C} = 1,53 + 0,48 + 9,211 + 0,863 = 12,08 \text{ m}^3$$

$$\text{Total P.C húmedos} = 12,08 \text{ m}^3 \text{ (18-2)}$$

$$O_2 = 0,863/12,08 = 0,0714$$

$$O_2 \text{ libre en P.C húmedos} = 7,14\% \text{ (18-2)}$$

3.

Nos piden calcular con análisis seco:

$$P.C \text{ sin aire exceso ni agua} = 12,08 - 4,11 - 0,48 = 7,49 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ del aire exceso en P.C} = 6 \cdot (79/21) = 22,57\%$$

$$\text{Aire exceso en P.C} = 22,57 + 6 = 28,57\%$$

$$P.C \text{ secos sin aire exceso} = 100 - 28,57 = 71,43\%$$

$$71,43\% = 7,49 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 7,49 \cdot (28,57/71,43) = 1,9958 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 100 \cdot (2,9958/7,55) = 39,6$$

$$\text{Aire exceso} = 39,6\% \text{ (18-3)}$$

EJERCICIO N°19 (7)

Los productos de combustión de un horno que quemó carbón pulverizado, fueron analizados y se encontró que contenían 5,7% de oxígeno libre, análisis seco. La composición del carbón era la siguiente:



C	73,6%	N	1,7%
H	5,3	H ₂ O	1,4
O	10,0	R	8,0

Las condiciones atmosféricas fueron temperatura. 52°F, barometro. 28,9 in, humedad, 68%

PREGUNTAS

- 1 El volumen de aire seco, en pies cubicos a condiciones normales, teóricamente requerido por libra de carbón.
- 2 El porcentaje del aire en exceso.
- 3 El volumen de aire humedo realmente utilizado por libra de carbon, medido a las condiciones dadas
- 4 Los granos de humedad llevados por pie cubico de los productos de combustión, y la presión parcial del vapor de agua en los gases.

SOLUCION

1.

Reacciones de combustión



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,736 \cdot (359/12) = 22,019 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,053 \cdot (359/4) = 4,756 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,1 \cdot (359/32) = 1,122 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ (aire teórico)} = 22,019 + 4,756 + 1,122 = 25,653 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 25,653/0,21 = 122,1 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico seco a C.N} = 122,1 \text{ ft}^3 \text{ (19-1)}$$

2

Este cálculo lo realizaremos sobre la base del oxígeno libre en los P.C:

P.C = CO₂ + H₂O + N₂(aire teórico+carbón) + Aire exceso):

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 22,019 \text{ ft}^3$$

$$N_2 \text{ (A.teórico + carbón)} = 0,017 \cdot (359/28) + 122,1 \cdot 0,79 = 96,677 \text{ ft}^3$$

$$\text{P.C secos sin aire exceso} = 22,019 + 96,677 = 118,696 \text{ ft}^3$$

$$C_2 \rightarrow N_2 \text{ (aire exceso) en P.C secos} = 5,7 \cdot (79,21) = 21,4\%$$

$$\text{Aire exceso en P.C secos} = 5,7 + 21,4 = 27,10\%$$

$$\text{P.C secos sin aire exceso} = 100 - 27,10 = 72,9\% = 118,696 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 118,696 \cdot (27,10/72,90) = 44,114 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 44,114/122,1 = 0,361$$

$$\text{Aire exceso} = 36,1\% \text{ (19-2)}$$

3.

$$\text{Total aire seco} = 122,1 + 44,114 = 166,2 \text{ ft}^3 \text{ (C.N)}$$

$$T = 52^\circ\text{F} = (5/9) \cdot (52 - 32) = 11^\circ\text{C}$$

Máxima presión de vapor de agua a 11°C = 9,8 mm (tablas XXIV del Apéndice)

$$\text{Presión real del vapor de agua} = 0,68 \cdot 9,8 = 6,7 \text{ mm}$$

Cálculo del aire humedo:

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 734 - 6,7 = 727 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273\text{K}$$

$$T_2 = 273 + 11 = 284\text{K}$$

$$V_1 = 166,2 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = 166,2 \cdot (760/273) \cdot (284/727) = 180,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D} = 180,7 \text{ ft}^3 \text{ (19-3)}$$

4

$$\text{P.C secos} = 118,696 + 44,114 = 162,81 \text{ ft}^3$$

H₂O en P.C = H₂O (carbon+reacción +humedad)

$$H_2O \text{ en P.C} = 0,014 \cdot 359/18 + 2 \cdot 4,756 + 166,2 \cdot (6,7/727,3) = 11,319 \text{ ft}^3$$

$$\text{P.C húmedos} = 162,81 + 11,319 = 174,102 \text{ ft}^3$$

1 grano = 0,0648 gramos = 0,000143 lbs.

$$H_2O \text{ total} = 11,319 \cdot 0,028 = 0,317 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 0,8063 \times 0,317 = 0,256 \text{ Kg} = 256 \text{ g.}$$

$$H_2O = 256 \text{ g.} \cdot (1 \text{ grano} / 0,0648 \text{ g}) = 3951 \text{ granos}$$

$$H_2O = 3951 / 174,102 = 22,7 \text{ gr./ft}^3$$

$$H_2O = 22,7 \text{ gr./ft}^3 \text{ de P.C húmedos (19-1)}$$

$$\text{Fracción de agua en los P.C} = 11,319 / 174,102 = 0,065$$

$$\text{Presión parcial de } H_2O = 0,065 \times 28,9 = 1,89 \text{ in.}$$

$$\text{Presión parcial del vapor de agua en P.C} = 1,89 \text{ in (19-4)}$$

EJERCICIO N°20 (7)

Un carbón analizó lo siguiente:

C	67,5%	N	1,0%
H	4,9	H ₂ O	2,8
O	9,3	R	14,5

Cuando fue quemado en un horno, los productos de combustión fueron analizados y se encontró que contenían 11,5% de CO₂, análisis seco.

Las cenizas del horno llevaron 18% de carbono sin quemar.

La temperatura del aire fue de 20°C barómetro, 765 mm, saturado con vapor de agua.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire seco, teóricamente requeridos por kilogramo de carbón, a condiciones normales.
2. El porcentaje de aire exceso utilizado
3. Los metros cúbicos de aire húmedo realmente utilizados, bajo las condiciones dadas.
4. A hacer el análisis de los gases secos, cuantos gramos de humedad fueron removidos por metro cúbico de aire húmedo a C.N?

SOLUCION

1.

Cálculo del C que reacciona.

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$100 \quad 82 \quad 18$$

$$U.C = 0,145 \cdot (18/82) = 0,032 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,675 - 0,032 = 0,643 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



cálculo del oxígeno del aire teórico.

$$O_2 \text{ del C} = 0,643 \cdot (22,4/12) = 1,2 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,049 \cdot (22,4/4) = 0,274 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,093 \cdot (22,4/32) = 0,065 \text{ m}^3$$

$$O_2(\text{aire teórico}) = 1,2 + 0,274 - 0,065 = 1,41 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,41 / 0,21 = 6,71 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico a C.N} = 6,71 \text{ m}^3 (20-1)$$

2.

$$\text{P.C secos} = CO_2 + N_2(\text{carbón+aire teórico}) + \text{aire exceso.}$$

$$CO_2 = 1,2 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ del carbón} = 0,01 \cdot (22,3/28) = 0,008 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ del aire teórico} = 6,71 \times 0,79 = 5,3 \text{ m}^3$$

$$\text{Total } N_2 \text{ sin el del aire exceso} = 0,008 + 5,3 = 5,308 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 11,5\% \text{ de los P.C secos}$$

$$\text{P.C secos} = 1,2 / 0,115 = 10,434 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 10,343 - 1,2 - 5,308 = 3,926 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 3,926 / 6,71 = 0,585$$

$$\text{Aire exceso} = 58,5\% (20-2)$$

3

$$\text{Máxima presión de vapor a } 20^\circ\text{C (tablas XXIV del Apéndice)} = 17,5 \text{ mm}$$

$$\text{Barómetro} = 765 \text{ mm}$$

Vamos a pasar el aire seco a condiciones dadas.

$$\text{Aire total seco a C.N} = 6,71 + 3,926 = 10,636 \text{ m}^3$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 765 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 20 = 293 \text{ K}$$

$$V = 10,636 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \text{aire seco a C.D}$$

$$V_2 = 10,636 \cdot (760/273) \cdot (293/765) = 11,34 \text{ m}^3$$

El aire está saturado con vapor de agua.

$$P = \text{presión aire seco} = 765 - 17,5 = 747,5 \text{ mm}$$

$$P = \text{presión de vapor de agua} = 17,5 \text{ mm}$$

$$V = \text{volumen aire seco} = 10,636 \text{ m}^3$$

$$V_1 = \text{volumen del vapor de agua} = ?$$

$$V_1 = 10,636 \cdot (17,5/747,5) = 0,249 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo C.D} = 11,34 + 0,25 = 11,59 \text{ m}^3$$

$$\text{Total aire húmedo a C.D} = 11,59 \text{ m}^3 \text{ (20-3)}$$

4.

Pasamos el aire húmedo a C.N

$$V_1 = 11,59 \cdot (765/293) \cdot (273/760) = 10,879 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O del aire a C.N} = 10,879 - 10,636 = 0,243 \text{ m}^3$$

$$\text{Total H}_2\text{O en P.C} = 0,243 + 2 \times 0,274 + 0,028 (22,4/18) = 0,8258 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C húmedos C.N} = 10,434 + 0,8258 = 11,26 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,8258 \text{ m}^3 \cdot (18 \text{ Kg}/22,4 \text{ m}^3) \cdot (1000 \text{ g}/1 \text{ Kg.}) = 663,59 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 663,59/11,26 = 59$$

$$\text{H}_2\text{O removida} = 59 \text{ g/m}^3 \text{ de P.C húmedos. (20-4)}$$

EJERCICIO N°21 (7)

Un horno open-hearth utilizo como combustible el gas producido en un horno para coquizar. Su análisis fue el siguiente:

H ₂	44,5%	C ₂ H ₄	3,0%
CO	6,0	C ₆ H ₆	0,8
CO ₂	3,0	N ₂	8,4
CH ₄	34,0	O ₂	0,3

Se utilizo 20% de aire en exceso y el aire contenia 20 gramos de vapor de agua por metro cubico de aire húmedo.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire húmedo utilizado, por metro cúbico de gas.
2. El volumen de los productos de combustión, por metro cubico de gas
3. Los gramos de vapor de agua contenidos en un metro cubico de productos de combustion

SOLUCION

1.

Componentes del gas que son combustibles H₂, CO, CH₄, C₂H₄ y C₆H₆. Estos gases reaccionan de acuerdo a como se muestra en el cuadro siguiente:

Reacciones	O ₂ + Productos m ³ de gas (m ³)		
	O ₂	CO ₂	H ₂ O
2H ₂ + O ₂ = 2H ₂ O	0,2225	---	0,445
CO + 1/2 O ₂ = CO ₂	0,03	0,06	---
CH ₄ + 2 O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	0,68	0,34	0,68
C ₂ H ₄ + 3 O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	0,04	0,06	0,06
C ₆ H ₆ + 7,5 O ₂ = 6CO ₂ + 3H ₂ O	0,16	0,048	0,024
Totales	1,0825	0,508	1,209

$$\text{O}_2 \text{ del aire teórico} = 1,0825 - 0,003 = 1,0795 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 1,0795/0,21 = 5,1405 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 5,1405 \times 1,2 = 6,1686 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad del aire} = 0,02 \text{ Kg/m}^3 \text{ de aire húmedo}$$

$$\text{Peso específico del agua} = 0,8063 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{Humedad} = 0,02/0,8063 = 0,0248 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de aire húmedo}$$

$$\text{Humedad total} = 6,1686 \times 0,0248 = 0,1530 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 6,1686 + 0,153 = 6,3216 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 6,3216 \text{ m}^3 \text{ (21-1)}$$

$$P.C = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{CO}_2 = 0,508 + 0,03 = 0,538 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,209 + 0,153 = 1,362 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 0,084 + 6,1686 \times 0,79 = 4,9572 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = (6,1686 - 5,1405) \cdot 0,21 = 0,2159 \text{ m}^3$$

$$\text{Total P.C} = 0,538 + 1,362 + 4,9572 + 0,2159 = 7,0731 \text{ m}^3$$

$$\text{Total P.C} = 7,0731 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas (21-2)}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,362 \times 0,8063 = 1,0982 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,0982 \times 1000/7,0731 = 155,26$$

$$\text{H}_2\text{O} = 155,26 \text{ g/m}^3 \text{ de P.C (21-3)}$$

EJERCICIO N°22 (7)

El gas subproducto de una coquizadora, fue utilizado para el calentamiento de una planta de coque y analizó lo siguiente:

CO ₂	3%	C ₂ H ₄	2%
CO	6	C ₆ H ₆	1
CH ₄	35	H ₂	44
N ₂	9		

Estos análisis fueron realizados después de secada la muestra realmente la humedad del gas era de 12% de agua.

El aire contenía 3% de humedad

Los productos de combustión de la cámara de calentamiento llevaron 2,6% de oxígeno bre. análisis seco.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire húmedo, utilizados para quemar un metro cúbico de gas húmedo
2. El porcentaje de aire exceso utilizado.
3. El volumen de cada constituyente de los productos de combustión
4. Los gramos de humedad contenidos en un metro cúbico de los productos de combustión.

SOLUCION

Los gases combustibles son: CO, CH₄, C₂H₄, C₆H₆ y H₂.

$$\text{H}_2\text{O en 1 m}^3 \text{ de gas húmedo} = 0,12 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas seco} = 1 - 0,12 = 0,88 \text{ m}^3.$$

Reacciones de combustión:

$$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2: \text{O}_2 = 0,88 \times 0,06 \times 0,5 = 0,0264 \text{ m}^3$$

$$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}: \text{O}_2 = 0,88 \times 0,35 \times 2 = 0,0616 \text{ m}^3$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 = 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}: \text{O}_2 = 0,88 \times 0,02 \times 3 = 0,0528 \text{ m}^3$$

$$\text{C}_6\text{H}_6 + 7,5 \text{O}_2 = 6 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}: \text{O}_2 = 0,88 \times 0,01 \times 7,5 = 0,066 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}: \text{O}_2 = 0,88 \times 0,44 \times 0,5 = 0,1936 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2(\text{aire teórico}) = 0,0264 + 0,0616 + 0,0528 + 0,066 + 0,1936 = 0,3948 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 0,3948/0,21 = 1,88 \text{ m}^3$$

$$P.C \text{ secos} = \text{N}_2(\text{gas}) + \text{N}_2(\text{aire teórico}) + \text{aire exceso} + \text{CO}_2$$

$$\text{Aire exceso en P.C secos} = 2,6/0,21 = 12,38\%$$

$$P.C \text{ secos sin aire exceso} = 100 - 12,38 = 87,62\%$$

$$\text{N}_2(\text{gas}) = 0,88 \times 0,09 = 0,0792 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2(\text{aire teórico}) = 1,88 \times 0,79 = 1,4852 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ total sin aire exceso} = 0,0792 + 1,4852 = 1,5644 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 0,88 \times 0,06 + 0,88 \times 0,35 + 0,88 \times 0,02 \times 2 + 0,88 \times 0,01 \times 6 = 0,4752 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{P.C. secos sin aire exceso} &= 3,6737 + 0,4752 = 4,1489 \text{ m}^3 \\ \text{Aire exceso} &= 4,1498 \cdot (12,38/87,62) = 0,59 \text{ m}^3 \\ \text{Aire total seco} &= 4,55 + 0,59 = 5,14 \text{ m}^3 \\ \text{Aire total húmedo} &= 5,14/0,97 = 5,30 \text{ m}^3 \\ \text{Aire total húmedo} &= 5,30 \text{ m}^3 \text{ (22-1)} \end{aligned}$$

2

$$\begin{aligned} \text{Aire exceso} &= 0,59/4,55 = 0,1297 \\ \text{Aire exceso} &= 13\% \text{ (22-2)} \end{aligned}$$

3,

El volumen de cada constituyente de los P.C., es: (22-3)

$$\text{N}_2 = 3,6737 + 0,59 \times 0,79 = 4,14 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = 0,59 \times 0,21 = 0,12 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 0,48 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,12 + 0,616 + 0,0528(2,3) + 0,066(3/7,5) + 0,88 \times 0,44 + 5,30 \times 0,03 = 1,34 \text{ m}^3$$

4

$$\text{Total P.C.} = 4,14 + 0,12 + 0,48 + 1,34 = 6,08 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O en estos} = 1,34 \cdot (18/22,4) \cdot 1000 = 1077 \text{ g.}$$

$$\text{Humedad} = 1077/6,08 = 177,14$$

$$\text{Humedad} = 177,14 \text{ g en 1 m}^3 \text{ de P.C. (22-4)}$$

EJERCICIO N°23 (7)

Un gas de una planta de coque hecho de un carbón de Connellsville tiene la siguiente composición:

C_6H_6	0,8%	CO_2	1,2%
C_2H_4	3,0	H_2	52,8
CH_4	32,0	N_2	0,4
CO	7,5	H_2O	2,3

Este gas entra a la puerta de un horno open-hearth a una temperatura de 90°F , presión de 29,90 in Hg. Es quemado con 25% de aire en exceso. La temperatura y presión del cual son 1800°F y 31,20 in.

El aire contiene 2% de vapor de agua.

Los productos de combustión dejan el horno a 3000°F y 29,6 in.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de aire seco teóricamente requeridos para quemar un pie cúbico de gas, ambos medidos a condiciones normales.
2. Los pies cúbicos de aire húmedo realmente utilizados por pie cúbico de gas, ambos medidos a condiciones dadas.
3. La composición de los productos de combustión y su volumen total, cuando dejan el horno.

SOLUCION

1.

Los gases combustibles en la mezcla son C_6H_6 , C_2H_4 , CH_4 , CO y H_2 . Sus reacciones, el oxígeno consumido al igual que sus productos para la combustión de 1 ft³ de la mezcla a C.N., se presentan en el cuadro siguiente:

Reacciones	O ₂ consumido + P.C. por ft ³ de gas (ft ³)		
	O ₂	CO ₂	H ₂ O
$C_6H_6 + 7 O_2 = 6CO_2 + 3H_2O$	0,06	0,048	0,024
$C_2H_4 + 3 O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	0,09	0,06	0,06
$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2H_2O$	0,64	0,32	0,64
$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,0375	0,075	---
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,264	---	0,528
Totales	1,0915	0,503	1,256

$$\text{Aire teórico} = 1,0915/0,21 = 5,2 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico a C.N} = 5,2 \text{ ft}^3 (23-1)$$

2

$$\text{Aire total seco} = 5,2 \times 1,25 = 6,5 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 6,5/0,98 = 6,63 \text{ ft}^3$$

Para mayor comodidad, hagamos algunos cambios de unidades.

$$1800^\circ\text{F} = 982,2^\circ\text{C}$$

$$90^\circ\text{F} = 32,2^\circ\text{C}$$

$$31,2 \text{ in} = 792,48 \text{ mm.Hg.}$$

$$31,9 \text{ in} = 810,26 \text{ mm.Hg.}$$

Dado que la composición del gas no varía con el cambio de condiciones, podemos considerar el volumen de aire calculado anteriormente, como a las condiciones en que 1 ft³ de gas entra a las puertas del horno. Además, la estequiometría de las reacciones se mantiene

Cambio de condiciones.

$$P_1 = 810,26 \text{ mm} \quad P_2 = 792,48 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 + 32,2 = 305,2\text{K} \quad T_2 = 982,2 + 273 = 1255,2\text{K}$$

$$V_1 = 6,63 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 (P_1/T_1) (T_2/P_2) = 27,88 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen de aire húmedo realmente utilizado, C.D} = 27,9 \text{ ft}^3 (23-2)$$

3.

$$\text{P.C} = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$$

$$N_2 = 6,5 \times 0,79 + 0,004 = 5,139 \text{ ft}^3$$

$$CO_2 = 0,503 + 0,012 = 0,515 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 1,256 + (6,63 - 6,5) + 0,023 = 1,409 \text{ ft}^3$$

$$O_2 (\text{exceso}) = (6,5 - 5,2) \times 0,21 = 0,273 \text{ ft}^3$$

Composición de los P.C (23-3)

Gas	Volumen (ft ³)	Composición (%)
N ₂	5,139	70,01
CO ₂	0,515	7,0
H ₂ O	1,409	19,2
O ₂	0,273	3,7
	7,336	100,0

$$1000^\circ\text{F} = 1649^\circ\text{C}$$

$$29,6 \text{ in} = 751,84 \text{ mm}$$

Cambio de condiciones

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 751,84 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273\text{K} \quad T_2 = 1649 + 273 = 1922\text{K}$$

$$V_1 = 7,336 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 7,336 \cdot (760/273) \cdot (1922/751,84) = 52,2 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen de los P.C al dejar el horno} = 52,2 \text{ ft}^3 (2. -3)$$

EJERCICIO N°24 (7)

Un horno para zinc es calentado con un gas natural cuyo análisis fue el siguiente

CH ₄	83,3%	H ₂	2,2%
C ₂ H ₄	3,2	N ₂	1,2
CO	3,4	H ₂ O	2,6
CO ₂	4,1		

El gas fue quemado en el horno con 5% de aire en exceso. Temperatura del aire, 25°C, presión barométrica, 745 mm, el aire estaba 2/3 saturado con vapor de agua.

La temperatura del gas cuando se quemó, 15°C.; presión, 785 mm.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire teórico seco por metro cúbico de gas, ambos medidos a condiciones normales.
2. Los metros cúbicos de aire húmedo realmente utilizado por metro cúbico de gas, ambos medidos a las condiciones reales.
3. La composición (%) de los productos de combustión cuando dejan el horno.
4. La temperatura a la cual el vapor de agua empieza a condensarse en los productos de combustión, (v.g. la temperatura de saturación para la presión parcial ejercida por la humedad en los P.C.).
5. Si los productos de combustión fueran enfriados por debajo de 25°C, ¿cuál sería entonces el porcentaje de vapor de agua en ellos, y cuántos gramos de agua se condensarían por metro cúbico de gas seco (medidos a condiciones normales)?

SOLUCION

1.

Los componentes gaseosos que reaccionan son: CH_4 , C_2H_4 , CO y H_2 .

En el cuadro siguiente se muestran las reacciones de combustión, el oxígeno consumido y los gases producidos

Reacciones de combustión	O ₂ consumido + P.C. por m ³ de gas (m ³)		
	O ₂	CO ₂	H ₂ O
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	666	0.833	1.666
$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	0.096	0.064	0.064
$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	0.017	0.032	---
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$	0.011	---	0.022
Totales	1.79	0.929	1.752

$$\text{Aire teórico} = 1.79/0.21 = 8.53 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico a C.N} = 8.53 \text{ m}^3 \text{ (24-1)}$$

2

$$\text{Aire total seco} = 8.53 \times 1.05 = 8.96 \text{ m}^3$$

$$\text{Saturación} = 2/3$$

$$\text{Máxima presión de saturación de vapor de agua a } 25^\circ\text{C} = 23.8 \text{ mm (tablas).}$$

$$\text{Presión real del vapor de agua} = 23.8(2/3) = 15.87 \text{ mm}$$

$$\text{Barómetro} = 745 \text{ mm}$$

$$\text{Presión de aire seco} = 745 - 15.87 = 729.13 \text{ mm}$$

$$\text{Vapor de agua} = 8.96 \times (15.87/729.13) = 0.195 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones del aire seco:

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 745 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 25 = 298 \text{ K}$$

$$V_1 = 8.96$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 (P_1/T_1) (T_2/P_2)$$

$$V_2 = 8.96 \cdot (760/273) \cdot (298/745) = 9.977 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 9.977 + 0.195 = 10.172 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire real húmedo a C.D} = 10.172 \text{ m}^3 \text{ (24-2)}$$

3

$$\text{P.C.} = \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{N}_2, \text{aire seco C.D} = 9.977 \times 0.79 = 7.882 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso C.D} = 9.977 \times 5/105 = 0.475 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2, \text{exceso} = 0.475 \times 0.21 = 0.1 \text{ m}^3$$

Para pasar de las C.N a las del aire, utilizamos la siguiente relación

$$(760 \times 298)/(273 \times 729.13) = 1.14, \text{ así.}$$

$$\text{CO}_2 = (0.929 + 0.041) \times 1.14 = 1.106 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = (1.752 + 0.026) \times 1.14 + 0.195 = 2.222 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 0.012 \times 1.14 + 7.882 = 7.986 \text{ m}^3$$

Para cambiar de las condiciones anteriores (del aire) a las de los P.C. cuando se enfriamos usaremos la siguiente relación:

$$P_1 = 729,13 \quad P_2 = 785 \text{ mm}$$

$$T_1 = 298\text{K} \quad T_2 = 288\text{K}$$

$$(P_1/T_1)(T_2/P_2) = 0,9$$

Composición del gas al salir del horno (24-3)

Gas	Volumen	%
$\text{CO}_2 = 1,106 \times 0,9 =$	0,9954	9,7%
$\text{H}_2\text{O} = 2,222 \times 0,9 =$	1,9998	19,5
$\text{N}_2 = 7,986 \times 0,9 =$	7,1874	69,9
$\text{O}_2 = 0,100 \times 0,9 =$	0,0900	0,9
	10,2726	100,0

4.

Presión parcial del agua en P.C = $785 \times 0,195 = 153 \text{ mm}$

Por tablas: T° para esta presión máxima de saturación = 62°C .

El vapor de agua empieza a condensar a 62°C (24-4)

5.

A 25°C , la presión de saturación del vapor de agua = $23,8 \text{ mm}$

$$\text{H}_2\text{O} = 23,8/785 = 0,0303$$

Vapor de agua en P.C por debajo de $25^\circ\text{C} = 3,03\%$ (24-5)

$$\text{Gas seco} = 10,2726 - 1,9998 = 8,2728 \text{ m}^3$$

$$\text{Presión de gas seco} = 785 - 153 = 632 \text{ mm}$$

$$\text{La presión equivalente al agua que se condensó será} = 153 - 23,8 = 129,2 \text{ mm}$$

Si el gas seco = 1 m^3 :

$$\text{Agua condensada} = 1 \text{ m}^3 \cdot (129,2/632) = 0,2044 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,2044 \text{ m}^3 \cdot (18 \text{ Kg}/22,4 \text{ m}^3) \cdot (1000 \text{ g}/1 \text{ Kg}) = 164,3$$

$$\text{H}_2\text{O condensada por m}^3 \text{ de gas seco} = 164,3 \text{ g (24-5)}$$

EJERCICIO N°25 (7)

El gas de coque utilizado en la combustión en un horno open hearth para aceros, tenía la siguiente composición:

CH_4	35%	CO	6%
C_2H_2	4	O_2	1
H_2	36	N_2	12
CO_2	4	H_2O	2

Los productos de combustión tenían $4,4 \text{ g}$ de humedad (vapor de agua) en cada pie cúbico.

El aire utilizado para la combustión lleva humedad. Se utilizó 20% de aire en exceso.

La presión de saturación del vapor de agua a la temperatura utilizada es de 26 mm ; barómetro, 760 mm

PREGUNTAS

1. El volumen de aire seco (pies cúbicos) teóricamente requerido para la combustión de un pie cúbico de gas.
2. El análisis de los productos de combustión secos (v.g. excluyendo todo el contenido de agua).
3. Los gramos de humedad por pie cúbico de aire húmedo, y el porcentaje de humedad

SOLUCION

1.

Para el cálculo del volumen de aire seco, basémonos en la tabla siguiente el oxígeno requerido por las reacciones de combustión, al igual que los productos de las reacciones y los gases que no intervienen en ellas. Todo por ft^3 de gas.

Reacciones	Gases requeridos y productos (ft ³ /ft ³)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	0.70	0.35	0.70	---
C ₂ H ₄ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	0.12	0.08	0.08	---
2H ₂ + O ₂ = 2H ₂ O	0.18	---	0.36	---
CO ₂	---	0.04	---	---
2CO + O ₂ = 2CO ₂	0.03	0.06	---	---
O ₂	0.01	---	---	---
N ₂	---	---	---	0.12
H ₂ O	---	---	0.01	---
Totales	1.04	0.53	1.18	0.12

$$\text{Aire teórico seco} = (1.04 - 0.01)/0.21 = 4.90 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 4.90 \text{ ft}^3 \text{ por ft}^3 \text{ de gas (25-1)}$$

2

$$\text{P.C. secos} = \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{Aire total seco} = 4.90 \times 1.2 = 5.88 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso seco} = 5.88 - 4.90 = 0.98 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ del aire} = 5.88 \times 0.79 = 4.645 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 4.645 + 0.12 = 4.765 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ exceso} = 0.98 \times 0.21 = 0.206 \text{ ft}^3$$

Análisis de los P.C. secos (25-2)

Gas	Volumen (ft ³)	Porcentaje
N ₂	4.765	86.6
CO ₂	0.53	9.6
O	0.206	3.8
	5.501	100.0

3.

Sea X = humedad del aire

$$\text{P.C. húmedos} = 5.501 + 1.18 + X$$

$$\text{Humedad por ft}^3 \text{ de los P.C.} = 4.4 \text{ g (0.0022 lb/g)} (359 \text{ ft}^3/18 \text{ lb}) = 0.193 \text{ ft}^3$$

$$\text{Humedad total en los P.C.} = (5.501 + 1.18 + X) \times 0.193$$

$$\text{Humedad total en los P.C.} = 1.18 + X$$

$$1.18 + X = 1.602 + 0.228 + 0.193X$$

$$\text{Resolviendo: } X = 0.136 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 5.88 + 0.136 = 6.016 \text{ ft}^3$$

$$\text{Humedad total en los P.C. húmedos} = (5.501 + 1.18 + 0.136) \times 4.4 = 30 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O (gas + reacción)} = 1.18 \text{ ft}^3 (18 \text{ lb}/359 \text{ ft}^3) (2.0022 \text{ lb/g}) = 26.9 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O del aire} = 30 - 26.9 = 3.1 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O del aire} = 3.1/6.016 = 0.52 \text{ g/ft}^3$$

$$\text{Humedad del aire} = 0.52 \text{ g por ft}^3 \text{ de aire húmedo. (25-3)}$$

$$\text{Máxima presión de saturación} = 26 \text{ mm}$$

$$\text{La cantidad máxima de agua que puede contener el aire será}$$

$$= 5.88 \times 26 / (760 - 26) = 0.208 \text{ ft}^3$$

$$\% \text{ de humedad} = \text{grado de saturación} = 100 \times 0.136 / 0.208 = 65.4$$

$$\text{Grado de saturación} = 65.4\% \text{ (25-3)}$$

EJERCICIO N°26 (7)

Un carbón de Pennsylvania tiene la siguiente composición:

C	77.20%	S	1.42%
H	5.10	H ₂ O	1.45
O	7.22	R	5.93
N	1.68		

Este carbon es quemado con 60% de aire en exceso. Las cenizas de horno totalizar 9.3% del peso del carbón.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica neta, en kilocalorias por kilogramo y en BTU por libra.
2. Los metros cúbicos de aire utilizados en la combustión por kilogramo de carbon.
3. La composición en porcentaje de los productos de combustión.
4. El contenido de humedad en los gases, en gramos por metro cúbico y en granos por pie cúbico.

SOLUCION

1.

La potencia calorífica neta, práctica o baja en kilocalorias por kilogramo se calcula por medio de la fórmula de Dulong:

$$\text{Potencia Calorífica Baja} = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W) \quad (2)$$

Donde los símbolos representan fracciones de 1 Kg. de los varios constituyentes mostrados en el análisis.

Cuando se hace el cálculo en BTU por libra, la fórmula de Dulong toma la forma siguiente:

$$\text{Potencia Calorífica Baja} = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S - 1050(9H + W) \quad (3)$$

Es necesario decir que el símbolo W se refiere al agua. Los demás símbolos ya son conocidos para cada uno de los elementos. Así, si abreviamos la Potencia Calorífica Neta, Práctica o Baja con las siglas: P.C.B., tendremos

$$P.C.B. = 8100(0,772) + 34000(0,051 - 0,0722/8) + 2200 \times 0,0142 - 586(9 \times 0,051 + 0,0145)$$

$$P.C.B. = 7435 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Potencia Calorífica Neta} = 7435 \text{ Kcal/Kg. (26-1)}$$

Utilizando (3):

$$P.C.B. = 14600 \times 0,772 + 61000(0,051 - 0,0722/8) + 4000 \times 0,0142 - 1050(9 \times 0,051 + 0,0145)$$

$$= 13393 \text{ B.T.U./lb.}$$

$$\text{Potencia Calorífica Neta} = 13393 \text{ B.T.U./lb (26-1)}$$

2.

Cálculo del carbono que reacciona.

$$\text{Cenizas} = R + U.C.$$

$$U.C. = 0,093 - 0,0593 = 0,0337 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,772 + 0,0337 = 0,7383 \text{ Kg.}$$

Elementos combustibles: C, H y S.

Reacciones:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,738 \cdot (22,4/12) = 1,38 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,051 \cdot (22,4/4) = 0,29 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 0,0142 \cdot (22,4/32) = 0,00994 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,0722 \cdot (22,4/32) = 0,051 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 1,38 + 0,29 + 0,00994 + 0,051 = 1,63 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,63/0,21 = 7,76 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 7,76 \times 1,6 = 12,41 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 12,41 \text{ m}^3 \text{ por Kg. de carbon (26-2)}$$

3.

$$P.C. = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,38 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 0,29 \times 2 + 0,0145 \cdot (22,4/18) = 0,598 \text{ m}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,01 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 0,0168 \cdot (22,4/28) + 12,41 \times 0,79 = 9,8094 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 12,41 - 7,76 = 4,65 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ libre} = 4,65 \times 0,21 = 0,98 \text{ m}^3$$

Composición de los P.C (26-3)

Gas	(m ³)	(%)
CO ₂	1,38	10,8%
H ₂ O	0,598	4,6
N ₂	9,81	76,8
SO ₂	0,01	0,1
O ₂	0,980	7,7
	12,778	100,0

4

Peso específico del agua = 0,8063

Humedad = $0,598 \times 0,8063 = 0,484 \text{ Kg.} = 484 \text{ g.}$ Humedad en los P.C = $484 / 12,78 = 37,87$ Humedad en los P.C = $37,87 \text{ g/m}^3 \text{ de gas (26-4)}$ $1 \text{ ft}^3 = 0,028 \text{ m}^3$ Volumen de gases = $12,78 / 0,028 = 456,4 \text{ ft}^3$

1 gramo = 15,432 granos

Total granos = $484 \times 15,432 = 7469$ Humedad en los P.C = $7469 / 456,4 = 16,3$ Humedad en los P.C = $16,3 \text{ gr./ft}^3 \text{ de gas (26-4)}$

EJERCICIO N°27 (7)

Un carbón de Pennsylvania tiene la siguiente composición:

C	76,3%	S	2,5%
H	4,9	H ₂ O	2,0
O	3,1	N	3,0
R	8,2		

Cuando fue utilizado en un horno, las cenizas contenían 14% de carbono sin quemar. Se utilizó 30% de aire en exceso.

La temperatura del aire fue de 25°C; barómetro 740 mm, presión parcial de humedad en el aire, 18 mm

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica práctica o baja del carbon en B.T.U por libra, y el porcentaje de ella perdido debido al carbono sin quemar en las cenizas.
2. Los pies cúbicos de aire teóricamente requeridos, secos y a condiciones normales por libra de carbon.
3. Los pies cúbicos de aire húmedo realmente utilizados, medidos a condiciones dadas por libra de carbón.
4. La composición (%) de los productos de combustión, y los granos de humedad llevada por ellos por pie cúbico a condiciones normales.

SOLUCION

1.

Mediante la ecuación (3) se puede calcular la Potencia Calorífica Neta, Baja o Práctica

$$P.C.B. = 14600 \times 0,763 + 61000 (\times 0,049 - 0,0318) + 4000 \times 0,025 - 1050 (9 \times 0,049 + 0,02) = 13508$$

Potencia Calorífica Práctica = 13508 B.T.U por libra (27-1)

Cenizas = R + U.C

100% 86% 14%

U.C = $0,082 \times (14/86) = 0,013 \text{ lbs.}$ Potencia calorífica perdida = $14600 \times 0,013 = 190 \text{ B.T.U}$ Potencia calorífica perdida = $190 / 13508 = 0,014$

Potencia calorífica perdida = 1,4% de la neta del carbón (27-1)

2.

 $C \rightarrow CO_2 = 0,763 - 0,013 = 0,75 \text{ lb}$

Elementos combustibles: C, H y S

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del } C = 0,75 \cdot (359/12) = 22,425 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del } H = 0,049 \cdot (359/4) = 4,40 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del } S = 0,025 \cdot (359/32) = 0,28 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,031 \cdot (359/32) = 0,35 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 22,425 + 4,40 + 0,28 + 0,35 = 26,755 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 26,755/0,21 = 127,4 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico seco (C.N)} = 127,4 \text{ ft}^3 \text{ (27-2)}$$

$$\text{Aire total seco (C.N)} = 127,4 \times 1,3 = 165,10 \text{ ft}^3$$

$$\text{Presión parcial de humedad} = 18 \text{ mm}$$

$$\text{Presión parcial de aire seco} = 740 - 18 = 722 \text{ mm}$$

$$\text{Humedad} = 165,10 \cdot (18/722) = 4,12 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo (C.N)} = 165,1 + 4,12 = 169,22 \text{ ft}^3$$

Cambio de condiciones del aire:

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 740 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273K \quad T_2 = 298K$$

$$V_1 = 169,22 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 169,22 \cdot (760/273) \cdot (298/740) = 189,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D} = 190 \text{ ft}^3 \text{ (27-3)}$$

$$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del } C = 22,425 \text{ ft}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del } S = 0,28 \text{ ft}^3$$

$$N_2 = N_2 \text{ (aire + carbón)}$$

$$N_2 = 165,1 \times 0,79 + 0,03 \cdot (359/28) = 130,829 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 165,1 - 127,4 = 37,7 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ libre} = 37,7 \times 0,21 = 8,0 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = H_2O \text{ (reacción + carbón + humedad aire)}$$

$$H_2O = 4,4 \times 2 + 0,02 \cdot (358/18) + 4,12 = 13,32 \text{ ft}^3$$

Composición de los P.C, C.N: (27-4)

Gas	Volumen (ft ³)	(%)
CO ₂	22,425	12,8%
SO ₂	0,28	0,2
N ₂	130,829	74,8
O ₂	8,0	4,6
H ₂ O	13,31	7,6
	174,844	100,0

$$\text{Granos de agua} = 13,32 \text{ ft}^3 (0,028 \text{ m}^3/\text{ft}^3) (0,8062 \text{ Kg./m}^3) (1000 \text{ g./Kg.}) (15,432 \text{ gr./g})$$

$$= 4661 \text{ gr.}$$

$$\text{Humedad} = 4661/174,844 = 26,6 \text{ gr/ft}^3$$

$$\text{Humedad} = 26,6 \text{ gr/ft}^3 \text{ de P.C, C.N (27-4)}$$

EJERCICIO N°28 (7)

Un carbón presenta la siguiente composición:

C	76,0%	O	7,8%
H	4,9	H ₂ O	1,5
S	1,2	R	8,6

El carbón es quemado sobre una parrilla, en un horno usado para fundir cobre pu o a fin de colarlo en lingotes.

Se funden 150 toneladas métricas en 10 horas, utilizando 17 toneladas métricas de carbón.

Las cenizas contenían 25% de carbono sin quemar.

Justo al finalizar la fusión del cobre, este contenía 172 kilocalorías por cada kilogramo. Los gases dejaron el horno a 1000°C.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizados por kilogramo de carbón.
2. Los metros cúbicos de los gases que dejan el horno por hora, a las condiciones reales.
3. La potencia calorífica del combustible, por hora.
4. El porcentaje de la potencia calorífica original que es utilizada en la fusión del cobre.

SOLUCION

1.

$$U C = 0,086 \cdot (25/75) = 0,0286 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,76 - 0,0286 = 0,7314 \text{ Kg.}$$

Elementos combustibles: C, H y S.

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,73 \cdot (22,4/12) = 1,365 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,049 \cdot (22,4/4) = 0,2744 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 0,012 \cdot (22,4/32) = 0,0084 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,078 \cdot (22,4/32) = 0,0546 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 1,365 + 0,2744 + 0,0084 - 0,0546 = 1,592 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,592/0,21 = 7,58 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 7,58 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón. (28-1)}$$

2.

Carbón total cargado = 17000 Kg

Este carbón está distribuido así:

$$C = 17000 \times 0,76 = 12920 \text{ Kg.}$$

$$H = 17000 \times 0,049 = 833$$

$$S = 17000 \times 0,012 = 204$$

$$O = 17000 \times 0,078 = 1326$$

$$H_2O = 17000 \times 0,015 = 255$$

$$R = 17000 \times 0,086 = 1462$$

$$C \rightarrow CO_2 = 17000 \times 0,7314 = 12433,8 \text{ Kg.}$$

Volvemos a calcular el O_2 y el aire:

$$O_2 \text{ del C} = 12433,8 \cdot (22,4/12) = 23210 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 833 \cdot (22,4/4) = 4664,8 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 204 \cdot (22,4/32) = 142,8 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 1326 \cdot (22,4/32) = 928,2 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 23210 + 4664,8 + 142,8 - 928,2 = 27089,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco (C.N)} = 27089,4/0,21 = 128997 \text{ m}^3$$



$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 23210 \text{ m}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 142,8 \text{ m}^3$$



$$H_2O = 255 \cdot (22,4/18) + 4664,8 \times 2 = 9647 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 128997 \times 0,79 = 101908 \text{ m}^3$$

$$P.C \text{ (C.N)} = 23210 + 142,8 + 9647 + 101908 = 134907,8 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones:

$$P_1 = P_2$$

$$T_1 = 273K$$

$$V_1 = 134908 \text{ m}^3$$

$$T_2 = 1273K$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$$

$$V_2 = V_1 \cdot (T_2 / T_1)$$

$$V_2 = 134908 \cdot (1273/273) = 628076 \text{ m}^3 \text{ de gas en 10 horas.}$$

$$V = 628076/10 = 62808 \text{ m}^3/\text{hr.}$$

$$\text{Gases que dejan el horno (C.D)} = 62808 \text{ m}^3/\text{hr. (21-2)}$$

3

Utilizando la ecuación (2):

$$P.C.B = 8100 \times 0.76 + 34000 (0.049 + 0.078/8) + 2200 \times 0.012 = 586 (9 \times 0.049 + 0.015) =$$

$$= 7250 \text{ Kcal/Kg. de carbón}$$

$$\text{Potencia calorífica del carbón} = 7250 \text{ Kcal/Kg. (28-3)}$$

4.

$$\text{Calor en el Cu fundido} = 150 \times 1000 \times 172 = 2.5 \times 10^7 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Potencia calorífica total del carbón} = 7250 \times 17 \times 1000 = 1.2325 \times 10^8 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor en la fusión del Cu.} = 2.5 \times 10^7 / 1.2325 \times 10^8 = 0.2028$$

$$\text{Calor en fusión del Cu} = 20.28\% \text{ del P.C del carbón (28-4)}$$

EJERCICIO N°29 (7)

En un horno se queman 3 toneladas métricas del siguiente carbon:

C	69.4%	O	9.6%
H	4.8	H ₂ O	6.2
N	0.8	R	9.2

Se forman 310 Kg. de cenizas

Los gases que salen por la chimenea totalizan 65200 m³ medidos a la temperatura de la chimenea de 230°C, y una presión de 725 mm.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del carbón por kilogramo.
2. El porcentaje de la potencia calorífica del carbon, representado por el carbon sin quemar en las cenizas.
3. Los metros cubicos de aire teóricamente requeridos para quemar el carbon, medidos a condiciones normales.
4. El porcentaje de aire exceso utilizado.

SOLUCION

1.

Utilizando la ecuación (2):

$$P.C.B = 8100 \times 0.694 + 34000 (0.048 + 0.096/8) + 0 = 586 (9 \times 0.048 + 0.062) = 6556$$

$$\text{Potencia Calorífica Baja} = 6556 \text{ Kcal/Kg. (29-1)}$$

2

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$R = 3000 \times 0.092 = 276 \text{ Kg.}$$

$$U.C = 310 - 276 = 34 \text{ Kg.}$$

$$\text{Potencia calorífica en U.C} = 8100 \times 34 = 275400 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B \text{ (total del carbon)} = 6556 \times 3000 = 1.9668 \times 10^7 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica de U.C} = 2.754 \times 10^5 / 1.9668 \times 10^7 = 0.014$$

$$\text{Potencia Calorífica de U.C} = 1.4\% \text{ de la del carbón (29-2)}$$

3.

Distribucion del carbón:

$$C = 3000 \times 0.694 = 2082 \text{ Kg.}$$

$$H = 3000 \times 0.048 = 144$$

$$N = 3000 \times 0.008 = 24$$

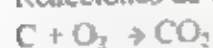
$$O = 3000 \times 0.096 = 288$$

$$H_2O = 3000 \times 0.062 = 186$$

$$R = 3000 \times 0.092 = 276$$

$$C \rightarrow CO_2 = 2082 - 34 = 2048 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico.

$$O_2 \text{ del C} = 2048 \times (22.4/12) = 3823 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}
 O_2 \text{ del H} &= 144 \cdot (22,4/4) = 806,4 \text{ m}^3 \\
 O_2 \text{ del carbón} &= 288 \cdot (22,4/32) = 201,6 \text{ m}^3 \\
 O_2 \text{ aire teórico} &= 3823 + 806 + 202 = 4427 \text{ m}^3 \\
 \text{Aire teórico} &= 4427/0,21 = 21081 \text{ m}^3 \\
 \text{Aire teórico a C.N} &= 21081 \text{ m}^3 \text{ (29-3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P.C &= CO_2 + H_2O + N_2(\text{sin aire exceso}) + \text{aire exceso} \\
 CO_2 &= O_2 \text{ del C} = 3823 \text{ m}^3 \\
 H_2O &= H_2O (\text{carbón} + \text{reacción}) \\
 H_2O &= 186 \cdot (22,4/18) + 2 \cdot 806,4 = 1844 \text{ m}^3 \\
 N_2 (\text{sin aire exceso}) &= 24 \cdot (22,4/28) + 21081 \cdot 0,79 = 16673 \text{ m}^3 \\
 P.C (\text{sin aire exceso}, C.N) &= 3823 + 1844 + 16673 = 22340 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Llevamos estos gases a las condiciones de la chimenea:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 725 \text{ mm} \\
 T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 503 \text{ K} \\
 V_1 &= 22340 \text{ m}^3 & V_2 &= ? \\
 V_2 &= 22340 \cdot (760/273) \cdot (503/725) = 43148 \text{ m}^3 \text{ C.D} \\
 \text{Aire exceso C.D} &= 65200 - 43248 = 21952 \text{ m}^3 \text{ C.D} \\
 \text{Aire teórico C.D} &= 21081 \cdot (760/273) \cdot (503/725) = 40717 \text{ m}^3 \\
 \text{Aire exceso} &= 21952/40717 = 0,539 \\
 \text{Aire exceso} &= 53,9\% \text{ (29-4)}
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°30 (7)

Un alto horno de la Bethlehem quema en su zona de combustión 760 toneladas métricas por día.

El coque tiene la siguiente composición:

C	88,8%
H	1,2
O	0,8
R	8,8
H ₂ O	0,4

En la zona de combustión del alto horno, las condiciones son tales que el carbono del coque se quema completamente a CO, mientras que el H no se quema, no hay aire en exceso.

Las condiciones atmosféricas promedias para los meses de Enero a Julio, de acuerdo al Lehigh University Weather Bureau, fueron las siguientes:

Enero: Temperatura, -1°C; Presión, 754 mm.; humedad, 78%
 Julio: Temperatura, 24°C; Presión, 747 mm.; humedad, 68%

El carbono quemado a CO desarrolla 2430 cal. Por kilogramo.

La humedad del aire es descompuesta en la zona de combustión del horno, absorbiendo 3213 Kcal. por kilogramo.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de soplo (aire) utilizados por kilogramo de coque, si el aire se asume seco a condiciones normales.
2. Lo anterior pero incluyendo la humedad, y medidos a las condiciones atmosféricas de Julio.
3. La potencia calorífica del coque (por kilogramo).
4. El porcentaje de esta potencia calorífica que es realmente desarrollada en la zona de combustión del horno.
5. Los kilogramos de agua que entran en el horno a través del soplo, en Enero y en Julio.
6. ¿Que porcentaje del calor desarrollado en el horno por combustión del coque, fue requerido para descomponer esta agua en cada uno de estos meses?
7. la composición (%) del gas resultante de la combustión, en Enero.

SOLUCION

1.

Reacción de combustión:



En este caso, el O_2 del combustible no se le resta al de las reacciones para encontrar el del aire, debido a que en este horno la carga sólida entra por arriba, mientras que el aire entra por la parte inferior. A la zona de combustión solo llegan el C y las cenizas, pues el oxígeno en la trayectoria se ha evaporado si está en forma de agua o ha reaccionado con algún otro elemento.

$$O_2 \text{ del C} = 0,888 \cdot (22,4/2 \times 12) = 0,8288 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 0,8288/0,21 = 3,94 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco a C.N} = 3,94 \text{ m}^3 \text{ (30-1)}$$

2.

Máxima presión de vapor de agua a $24^\circ\text{C} = 22,4 \text{ mm}$ (tablas)

$$\text{Presión real} = 22,4 \times 0,68 = 15,2 \text{ mm}$$

$$\text{Presión de aire seco} = 747 - 15,2 = 731,8 \text{ mm}$$

$$\text{Humedad} = 3,94 \cdot (15,2/731,8) = 0,082 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo C.N} = 0,082 + 3,94 = 4,022 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones para el mes de Julio:

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 747 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 273,28 - 301 \text{ K}$$

$$V_1 = 4,022 \text{ m}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$V_2 = 4,022 \cdot (760/273) \cdot (301/747) = 4,51 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D; mes de Julio} = 4,51 \text{ m}^3 \text{ (30-2)}$$

3.

Utilizando la ecuación (2)

$$P.C.B = 8100 \times 0,888 + 34000 \cdot (0,012 \cdot 0,0088) + 0 \cdot 586 \cdot (9 \times 0,012 + 0) = 7503,5$$

$$\text{Potencia calorífica del coque} = 7503,5 \text{ Kcal/Kg. (30-3)}$$

4.

$$\text{Potencia calorífica (C} \rightarrow \text{CO)} = 0,888 \times 2430 = 2157,84 \text{ Kcal./Kg.}$$

$$\text{Potencia calorífica desarrollada} = 2157,84/7504 = 0,287$$

$$\text{P.C del coque desarrollada en zona combustión} = 28,7\% \text{ (30-4)}$$

5.

$$\text{C total en coque} = 0,888 \times 760 \times 1000 = 674880 \text{ Kg.}$$

$$O_2 \text{ del C} = 674880 \cdot (22,4/24) = 629888 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total C.N} = 629888/0,21 = 2'999.466 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad del aire en Julio} = 2'999.466 \cdot (15,2/731,8) = 62301 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad del aire en Julio} = 62301 \cdot (18/22,4) = 50063 \text{ Kg./día}$$

$$\text{Humedad del aire en Julio} = 50063 \text{ Kg./día (30-5)}$$

Para el mes de Enero:

Máxima presión de vapor a $-1^\circ\text{C} = 4,2 \text{ mm}$ (interpolación)

$$\text{Presión real} = 4,2 \times 0,78 = 3,28 \text{ mm}$$

$$\text{Presión de aire seco} = 754 - 3,28 = 750,72 \text{ mm}$$

$$\text{Humedad} = 2'999.466 \cdot (3,28/750,72) = 13105 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad del aire en Enero} = 13105 \cdot (18/22,4) = 10530 \text{ Kg./día}$$

$$\text{Humedad del aire en Enero} = 10530 \text{ Kg./día (30-5)}$$

6.

$$\text{Potencia calorífica total (C} \rightarrow \text{CO)} = 2,58 \times 674880 = 1456.391.040 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de descomposición agua (Enero)} = 10530 \times 3213 = 33'832.890 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de descomposición agua (Enero)} = 33'832.890/1456.391.040 = 0,023$$

$$\text{Calor de descomposición agua (Enero)} = 2,3\% \text{ (30-6)}$$

$$\text{Calor de descomposición agua (Julio)} = 50063 \times 3213 = 160'852.419 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor de descomposición agua (Julio)} = 160'852.419/1456'391.040 = 0,110$$

$$\text{Calor de descomposición agua (Julio)} = 11,0\% \text{ (30-6)}$$

7.

Gas resultante de la combustión en Enero = $CO + N_2 + H_2$

$$CO \text{ (C.N)} = 674880 \cdot (22,4/12) = 1'259.776 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ (C.N)} = 2'999.466 \times 0,79 = 2'369.578 \text{ m}^3$$

$$H_2 = H_2 \text{ (coque + humedad coque + humedad aire)}$$

$$H_2 \text{ del coque} = 760 \times 1000 \times 0,012 \times 22,4/2 = 102144 \text{ m}^3 \text{ (C.N)}$$

Descomposición del agua:



$$\text{H}_2 \text{ del agua del coque} = 760 \times 1000 \times 0,004 \times 22,4/18 = 3783 \text{ m}^3$$

Humedad mes de Enero = 13105 m³

Esta humedad debe ser pasada a C.N:

$$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 = 13105 \cdot (751/272) \cdot (273/760) = 12997 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 = 102144 + 3783 + 12997 = 118924 \text{ m}^3$$

Composición del gas en el mes de Enero (30-7)

Gas	Volumen (m ³)	Composicion
CO	1'259.776	33,6%
N ₂	2'369.578	63,2
H ₂	118.924	3,2
	3'748.278	100,0

EJERCICIO N°31 (7)

Un horno es calentado con un aceite que tiene la siguiente composición:

C	84,6%
H	10,9
S	0,7
O	3,8

Se suministró 15% de aire en exceso. La gravedad específica del aceite, 0,924, grados Beaumé, 21,5.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del aceite, ambas alta y baja, en BTU por libra y en Kcal por galón (usar la fórmula de Dulong).
2. La potencia calorífica calculada por la fórmula de Sherman y Kropff
3. Los pies cúbicos de aire utilizado, por libra de aceite.
4. Porcentaje de oxígeno libre en los productos de combustión.

SOLUCION

1.

La fórmula de Dulong para la potencia calorífica alta o bruta (P C A) de un combustible es

$$\text{P C A} = 14600\text{C} + 61000(\text{H}-\text{O}/8) + 4000\text{S} = \text{BTU por libra}$$

$$\text{P C A} = 14600 \times 0,846 + 61000(0,109 - 0,038/8) + 4000 \times 0,007 = 18740$$

$$\text{Potencia Calorífica Alta} = 18740 \text{ BTU/lb (31-1)}$$

Con la fórmula (3), calculamos la potencia calorífica baja

$$\text{P C B} = 14600 \times 0,846 + 61000(0,109 - 0,038/8) + 4000 \times 0,007 - 1090(9 \times 0,109 + 0) = 17710$$

$$\text{Potencia Calorífica Baja} = 17710 \text{ BTU/lb (31-1)}$$

$$\text{P C A} = 8100\text{C} + 34000(\text{H}-\text{O}/8) + 2200\text{S}$$

$$\text{P.C.A} = 8100 \times 0,846 + 34000(0,109 - 0,038/8) + 2200 \times 0,007 = 10412,5 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$\text{Volumen de 1 Kg. de aceite} = 1/0,924 = 1,082 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ galón} = 3,785 \text{ litros.}$$

$$\text{P C A} = 10412,5 \text{ Kcal/Kg} \times (1 \text{ Kg.} \cdot 1,082 \text{ m}^3) \times (1 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ lts}) \times (3,785 \text{ lts} \cdot 1 \text{ galón})$$

$$= 36,428 \text{ Kcal/galón}$$

$$\text{Potencia Calorífica Alta} = 36,428 \text{ Kcal/galón (31-1)}$$

Utilizando la fórmula (2):

$$\text{P.C B} = 8100\text{C} + 34000(\text{H}-\text{O}/8) + 2200\text{S} - 586(9\text{H} + \text{W})$$

$$\text{P C.B} = 10412,5 - 0,574,6 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$\text{Potencia Calorífica Baja} = 34,417 \text{ Kcal/galón (3-1)}$$

2.

La Fórmula de Sherman y Kropff, es la siguiente:

$$\text{BTU/lb} = 18650 + 40(\text{°Bé} - 10)$$

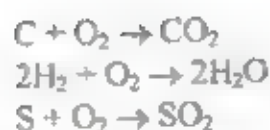
$$\text{°Bé} = \text{grados Beaumé}$$

$$\text{BTU/lb} = 18650 + 40(21,5 - 10) = 19110$$

$$\text{Potencia Calorífica del aceite} = 19110 \text{ BTU/lb (31-2)}$$

3

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico:

$$\begin{aligned}O_2 \text{ del C} &= 0,846 \cdot (359/12) = 25,2954 \text{ ft}^3 \\ O_2 \text{ del H} &= 0,109 \cdot (359/4) = 9,7828 \text{ ft}^3 \\ O_2 \text{ del S} &= 0,007 \cdot (359/32) = 0,0785 \text{ ft}^3 \\ O_2 \text{ del aceite} &= 0,038 \cdot (359/32) = 0,426 \text{ ft}^3 \\ O_2 \text{ para el aire teórico} &= 25,2954 + 9,7828 + 0,0785 + 0,426 = 34,7307 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire teórico} &= 34,7307/0,21 = 165,38 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire total} &= 165,38 \times 1,15 = 190 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire utilizado por libra de aceite} &= 190 \text{ ft}^3 \text{ (31-3)}\end{aligned}$$

4

$$\begin{aligned}P.C &= N_2 + CO_2 + H_2O + SO_2 + O_2 \\ N_2 &= 190 \times 0,79 = 150,1 \text{ ft}^3 \\ CO_2 &= O_2 \text{ del C} = 25,3 \text{ ft}^3 \\ SO_2 &= O_2 \text{ del S} = 0,08 \text{ ft}^3 \\ H_2O &= 2 O_2 \text{ del H} = 9,78 \times 2 = 19,56 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire exceso} &= 190 - 165,38 = 24,62 \text{ ft}^3 \\ O_2 \text{ libre} &= 24,62 \times 0,21 = 5,17 \text{ ft}^3 \\ \text{Total P.C} &= 150,1 + 5,17 + 25,30 + 19,56 + 0,08 = 200,21 \text{ ft}^3 \\ O_2 \text{ en P.C} &= 5,17/200,21 = 0,026 \\ O_2 \text{ libre en P.C} &= 2,6\% \text{ (31-4)}\end{aligned}$$

EJERCICIO N°32 (7)

Un horno utiliza un gas de coquería de la siguiente composición

H ₂	37,6%	CO	5,6%
CH ₄	40,8	CO ₂	3,7
C ₂ H ₄	4,6	N ₂	5,4
C ₆ H ₆	1,2	H ₂ O	1,1

El gas es quemado con 20% de aire en exceso. El aire lleva humedad, asumir que la humedad es del 40%.

La temperatura del aire es 25°C; barómetro, 730 mm.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del gas, por metro cúbico a C.N. y por metro cúbico a condiciones atmosféricas.
2. Los metros cúbicos de aire húmedo a condiciones dadas, utilizados para quemar 1 m³ de gas a condiciones normales.
3. El volumen de los gases resultantes de la combustión de un metro cúbico de gas a condiciones normales.

SOLUCION

1.

La potencia calorífica de los combustibles gaseosos se calcula sumando las potencias caloríficas de los gases constituyentes individuales. En este caso, cualquier contenido de agua se encontrará en forma de vapor y no necesita calor adicional para vaporizarse.

La potencia calorífica de los gases principales se dan en la tabla que se muestra a continuación. Una tabla más extensa se encuentra en el Apéndice.

Potencia Calorífica (Baja) de los Gases Combustibles más Comunes(C.N)

Gas	Kilocalorias por metro cubico	B T U por pie cubico
CO	3034	341
H ₂	2582	290
CH ₄	8560	962
C ₂ H ₂	13440	1510
C ₂ H ₄	14480	1627
C ₆ H ₆	33490	3763

De acuerdo con la tabla anterior, la potencia calorífica a C.N para cada uno de los gases de la mezcla sería

$$\begin{aligned}
 H_2 &= 0,376 \times 2582 &= 971 \text{ Kcal} \\
 CH_4 &= 0,408 \times 8560 &= 3492 \\
 C_2H_4 &= 0,046 \times 14480 &= 666 \\
 C_6H_6 &= 0,012 \times 33490 &= 402 \\
 CO &= 0,056 \times 3034 &= 170 \\
 &&5701
 \end{aligned}$$

Potencia calorífica a C.N = 5701 Kcal/m³ de gas (32-1)

Como el valor calculado anteriormente se refiere a condiciones normales, debemos determinar m³ de gas a condiciones atmosféricas, a cuantos m³ de gas a C.N corresponde

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 730 \text{ mm} & P_2 &= 760 \text{ mm} \\
 T_1 &= 298K & T_2 &= 273K \\
 V_1 &= 1 \text{ m}^3 & V_2 &=? \\
 V &= 1 \cdot (730/298) \cdot (273/760) = 0,88 \text{ m}^3 \\
 \text{Potencia calorífica} &= 5701 \cdot (0,88/1) = 5017
 \end{aligned}$$

Potencia Calorífica a C.D = 5017 Kcal/m³ de gas (32-1)

2.

Para el cálculo del aire seco, basemonos en el siguiente cuadro que muestra las reacciones de la combustión, el oxígeno producido así como los productos de las reacciones, por m³ de gas a C.N

Reacciones	O ₂ + Productos (m ³)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
2H ₂ + O ₂ → 2H ₂ O	0,188	---	0,376	---
C ₂ H ₄ + 3O ₂ → 2CO ₂ + 2H ₂ O	0,816	0,408	0,816	---
C ₂ H ₂ + 3O ₂ → 2CO ₂ + 2H ₂ O	0,138	0,092	0,092	---
C ₆ H ₆ + 7 1/2 O ₂ → 6CO ₂ + 3H ₂ O	0,090	0,072	0,036	---
2CO + O ₂ → 2CO ₂	0,028	0,056	---	---
CO	---	0,037	---	---
H ₂ O	---	---	0,011	---
N ₂	---	---	---	0,054
Totales	1,260	0,665	1,331	0,054

$$\text{Aire teórico seco} = 1,26/0,21 = 6,0 \text{ m}^3 \text{ (C.N)}$$

$$\text{Aire total seco a C.N} = 6,0 \times 1,2 = 7,20 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad del aire} = 40\%$$

$$\text{Máxima presión de saturación del aire con vapor de agua a } 25^\circ\text{C} = 23,8 \text{ mm (tablas)}$$

$$\text{Presión real} = 23,8 \times 0,4 = 9,52 \text{ mm}$$

Cálculo del aire húmedo C.D:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 730 - 9,52 = 720,48 \text{ mm} \\
 T_1 &= 273K & T_2 &= 298K \\
 V_1 &= 7,2 \text{ m}^3 & V_2 &=? \\
 V_2 &= 7,2 \cdot (760/273) \cdot (298/720,48) = 8,29 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{Aire húmedo C.D por m}^3 \text{ de gas} = 8,29 \text{ m}^3. \text{ (32-2)}$$

3.

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$$

$$N_2 = 7,2 \times 0,79 + 0,054 = 5,74 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}
 O_2 \text{ libre} &= (7,2 - 6) \times 0,21 = 0,252 \text{ m}^3 \\
 H_2O &= 1,331 + 7,2 \cdot (9,52/720,48) = 1,426 \text{ m}^3 \\
 \text{Total P.C} &= 0,665 + 5,74 + 0,252 + 1,426 = 8,08 \text{ m}^3 \\
 \text{P.C resultante de la combustión de 1 m}^3 \text{ de gas} &= 8,08 \text{ m}^3 \text{ (32-3)}
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°33 (7)

Un gas de un productor de gas, utilizado para calentar un horno open-hearth tenía la siguiente composición.

CO	25,4%	CH ₄	2,1%
CO ₂	4,4	H ₂ O	2,9
H ₂	17,2	N ₂	48,0

Este gas fue quemado con 10% de aire en exceso. El aire utilizado llevó humedad en cantidad de 16 granos por pie cúbico de aire húmedo. Presión barométrica, 750 mm

PREGUNTAS

1. la potencia calorífica del gas, por pie cúbico.
2. Los pies cúbicos de aire húmedo utilizados para quemar un pie cúbico de gas.
3. La composición (%) de los productos de combustión.
4. La presión parcial de la humedad en (a) el aire, (b) los productos de combustión

SOLUCION

Ver la tabla del ejercicio #32 para el cálculo de la potencia calorífica de

$$CO = 341 \times 0,254 = 87 \text{ BTU}$$

$$H_2 = 290 \times 0,172 = 50$$

$$CH_4 = 962 \times 0,021 = 20$$

$$\text{Potencia calorífica total} = 87 + 50 + 20 = 157 \text{ BTU}$$

$$\text{Potencia calorífica por ft}^3 \text{ del gas} = 157 \text{ BTU (33-1)}$$

2.

El cuadro siguiente muestra el O₂ consumido y los productos de combustión de las respectivas reacciones, pie ft³ de gas

Reacciones	O ₂ + P.C (ft ³)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N
C + O ₂ → 2CO	0,127	0,254	---	---
2H ₂ + O ₂ → 2H ₂ O	0,086	---	0,172	---
H ₂ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O	0,043	0,021	0,042	---
CO ₂	---	0,044	---	---
H ₂ O	---	---	0,029	---
N	---	---	---	0,48
Totales	0,255	0,319	0,243	0,48

$$\text{Aire teórico seco} = 0,255/0,21 = 1,214 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 1,214 \times 1,1 = 1,3354 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total granos} = 1,3354 \times 16 = 21,3664$$

$$1 \text{ grano} = 0,0648 \text{ gramos}$$

$$\text{Gramos} = 21,3664 \times 0,0648 = 1,385$$

$$\text{Peso específico del agua} = 0,8063$$

$$\text{Humedad} = 1,385/(0,8063 \times 1000) = 0,00171 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad} = 1,71 \times 10^{-3} / 2,8 \times 10^{-2} = 0,061 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 1,33 + 0,061 = 1,39 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 1,39 \text{ ft}^3 \text{ (33-2)}$$

3

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$$

$$N_2 = 1,3354 \times 0,79 + 0,48 = 1,535 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 0,243 + 0,061 = 0,403 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ libre} = (1,335 - 1,214) \times 0,21 = 0,0254 \text{ ft}^3$$

Composición de los P.C (33-3)

Gas	Volumen (ft ³)	Composición (%)
CO ₂	0,319	14,6
N ₂	1,535	70,3
O ₂	0,0254	1,2
H ₂ O	0,304	13,9
	2,1834	100,0

Aire húmedo = 1,39 ft³

Humedad = 0,061 ft³

H₂O en aire = 0,061/1,39 = 0,044 = 4,4%

Presión parcial de humedad en el aire = 0,044x760 = 33,44 mm

(a): Presión parcial de humedad en el aire = 33,44 mm (33-4)

Presión parcial en los P.C = 0,139x750 = 105,0 mm.

(b): Presión parcial de humedad en los P.C = 105,0 (33-4)

EJERCICIO N°34 (7)

La siguiente es la composición de un carbon de Newcastle, England (análisis seco)

C	78,0%	S	1,4%
H	4,8	N	1,8
O	10,3	R	3,7

En adición el carbon lleva humedad en una cantidad igual al 4,2% de su peso seco. Este carbón es quemado en un horno de fusión con 60% de aire exceso.

Las cenizas del horno llegan al 4,3% del peso del carbon.

El aire, asumido seco, se encuentra a 20°C y 740 mm de presión.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del carbon, seco y húmedo.
2. Los metros cubicos de aire utilizado para quemar el carbon, por kilogramo de carbon húmedo, a las condiciones dadas.
3. El volumen y la composición de los productos de combustión tal como salen del horno.
4. La cantidad de calor, kilocalorias por kilogramo de carbon húmedo, que sale del horno en los productos de la combustión.

SOLUCION

1.

Análisis seco.

Basta utilizar la expresion (?) de Dulong para encontrar la potencia calorífica

$$P.C.B = 81000 \times 0,78 + 34000 (0,048 - 0,003 \times 8) + 2200 \times 0,103 - 586 (9 \times 0,048 + 0,1)$$

$$= 7289,898$$

Potencia Calorífica Baja = 7290 Kcal/Kg. de carbon (34-1)

Análisis húmedo.

Peso del carbon seco = 1 Kg.

Peso del carbon húmedo = 1 + 0,042 = 1,042 Kg.

La composición del carbon húmedo sería:

C	0,780 Kg.	74,86%
H	0,048	4,61
O	0,103	9,88
S	0,014	1,34
N	0,018	1,73
R	0,037	3,55
H ₂ O	0,042	4,03
	1,042 Kg.	100,00

$$P.C.B. = 81,38 \times 7486 = 34000 (0,0461 + 0,0988/8) + 2200 \times 0,0134 = 586 (9 \times 0,0461 + 0,040)$$

$$= 6974$$

Potencia Calorífica Baja = 6974 Kcal/Kg. de carbon (34-1)

2.

$$U.C. = 0,043 - 0,0355 = 0,0075 \text{ Kg.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,741 \cdot (22,4/4) = 1,383 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,0461 \cdot (22,4/4) = 0,258 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del S} = 0,0134 \cdot (22,4/32) = 0,009 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,0988 \cdot (22,4/32) = 0,07 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 1,383 + 0,258 + 0,009 + 0,07 = 1,58 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total C.N.} = 1,6 \cdot (1,58/0,21) = 12,04 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones.

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 740 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K} \quad T_2 = 293 \text{ K}$$

$$V_1 = 12,04 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 12,04 \cdot (760/273) \cdot (293/740) = 13,27 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 13,27 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón húmedo (34-2)}$$

3

$$P.C. = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,383 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 0,258 \times 2 + 0,0403 \cdot (22,4/18) = 0,566 \text{ m}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,009 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 0,0173 \cdot (22,4/28) + 12,04 \times 0,79 = 9,525 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ libre} = (12,04 - 1,58/0,21) \times 0,21 = 0,948 \text{ m}^3$$

Volumen y composición de los P.C (34-3):

Gas	Volumen(m ³)	Composición(%)
CO ₂	1,383	11,13
H ₂ O	0,566	4,55
N ₂	9,525	76,62
O ₂	0,948	7,63
SO ₂	0,009	0,07
	12,431	100,00

La composición al salir del horno es la misma que a C.N., pero el volumen cambia.

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 760 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K} \quad T_2 = 1273 \text{ K}$$

$$V_1 = 12,431 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 12,431 \cdot (1273/273) = 58 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas al salir del horno} = 58 \text{ m}^3 \text{ (34-3)}$$

4

Para este cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

$$\text{Contenido de calor sensible} = \text{cantidad} \times \text{calor específico} \times \text{temperatura} \quad (4)$$

Los calores específicos se encuentran en la Tabla XV en el Apéndice, sus unidades en este caso son Kcal /m³, a C.N.

Estos calores específicos son para:

$$CO_2 \text{ y } SO_2: 0,406 + 9 \times 10^{-5} t$$

$$H_2O: 0,373 + 5 \times 10^{-5} t$$

$$N_2 \text{ y } O_2: 0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t$$

$$T = ^\circ C$$

Contenido de calor de los gases al salir:

$$SO_2 + CO_2 \cdot (0,009 + 1,383) \cdot (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 690,4 \text{ Kcal}$$

$$H_2O = 0,566 \cdot (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 239,4 \text{ Kcal.}$$

$$N_2 + O_2 = (9,525 + 0,948) \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 3393,3 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Total calor} = 690,4 + 239,4 + 3393,3 = 4323,1 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor sacado por los gases} = 4323,1 \text{ Kcal/Kg. de carbón húmedo (34-4)}$$

EJERCICIO N°35 (7)

Un horno utiliza el siguiente carbón:

C	80%
H	4
O	8
H ₂ O	4
R	4

Las cenizas tomadas del horno contenían $3 \frac{1}{2}$ partes de residuo a 1 parte de carbono

La cantidad de aire utilizado fue $1/6$ más que el teóricamente requerido.

El aire contiene humedad en cantidad de 25 gramos por metro cúbico de aire húmedo.

Los gases dejan la chimenea a 600°C.

PREGUNTAS

1 El porcentaje de la potencia calorífica del carbon que sale por la chimenea en los productos de combustión calientes.

SOLUCION

1

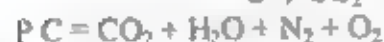
$$P.C.B = 8100C + 34000(H - O/8) + 22005 \cdot 586(9H - W)$$

$$P.C.B = 8100 \times 0,8 + 34000(0,04 - 0,08/8) + 0 \cdot 586(9 \times 0,04 + 0,04) = 7266 \text{ Kcal/Kg de carbón}$$

Por cada 3,5 partes de residuo(R) hay 1 parte de carbono (U.C) en las cenizas

$$U.C = 0,04/3,5 = 0,0114 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,8 - 0,011 = 0,789 \text{ Kg.}$$



Estos son los gases calientes que salen por la chimenea y para calcularlos debemos empezar por el cálculo del aire teórico:

Reacciones de combustión.



Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,798 \cdot (22,4/12) = 1,475 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,04 \cdot (22,4/4) = 0,224 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,08 \cdot (22,4/32) = 0,056 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 1,475 + 0,224 - 0,056 = 1,643 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 1,643/0,21 = 7,82 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 1,82 \cdot (7/6) = 9,12 \text{ m}^3$$

Cálculo de la humedad del aire:

Sea $X = \text{m}^3$ de aire húmedo

$$\text{Humedad del aire} = 25X \text{ g. } (1 \text{ Kg.}/1000 \text{ g}) \cdot (22,4/18) = 0,031X \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco} = X - 0,031X = 0,969X$$

$$0,969X = 9,12 \therefore$$

$$X = 9,12/0,969 = 9,412 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad} = 9,412 \times 0,031 = 0,292 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ total} = 0,292 \cdot (18/22,4) + 0,04 + 0,224 \cdot (18/22,4) = 0,455 \text{ Kg.}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 0,789 \cdot (44/12) = 2,893 \text{ Kg.} \\ \text{N}_2 &= 9,12 \times 0,79 \cdot (28/22,4) = 9,01 \text{ Kg.} \\ \text{O}_2 \text{ exceso} &= (9,12 - 7,82) \times 0,21 \cdot (32/22,4) = 0,39 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

La ecuación (4) se puede resumir en la siguiente fórmula.

$$Q = W(A + Bt)xt \quad (4)$$

donde:

Q = contenido de calor sensible
W = cantidad de gas
A + Bt = calor específico (tabla XV del Apéndice)
T = temperatura.

Aplicando (4) y los datos de la tabla XV del Apéndice tendremos:

Contenido de calor sensible de:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 2,893 \cdot (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 404 \text{ Kcal.} \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,455 \cdot (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 137 \text{ Kcal} \\ \text{N}_2 &= 9,01 \cdot (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 1364 \text{ Kcal} \\ \text{O}_2 &= 0,39 \cdot (0,211 + 1,56 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 32 \text{ Kcal.} \\ Q &= 404 + 137 + 1364 + 32 = 1957 \text{ Kcal.} \\ Q &= 1957/7266 = 0,2693 \\ \text{Calor sacado por los P.C} &= 26,93\% \text{ de la P.C.B del carbón (35.1)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°36 (7)

Un horno de fusión quema carbon pulverizado de Illinois, utilizando 20% de aire en exceso del teóricamente requerido, el aire contenía 1% de humedad. El análisis de carbon es el siguiente:

C	54,8%	N	1,1%
H	3,9	S	3,6
O	8,7	R	14,7
H ₂ O	13,2		

Los productos gaseosos resultantes de la combustión dejan el horno a 2200°F

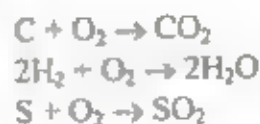
PREGUNTAS

1. Los pies cubicos de aire (humedo) utilizados, por libra de carbón.
2. El volumen y composicion (%), de los productos de la combustión.
3. La potencia calorífica del carbón.
4. El porcentaje del valor calorífico del carbon perdido en los gases calientes
5. ¿Que proporción de esta pérdida es debida al aire en exceso?

SOLUCION

1

Reacciones de combustion:



Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ del C} &= 0,548 \cdot (359/12) = 16,39 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del H} &= 0,039 \cdot (359/4) = 3,50 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del S} &= 0,036 \cdot (359/32) = 0,40 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del carbón} &= 0,087 \cdot (359/32) = 0,98 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del aire teórico} &= 16,39 + 3,50 + 0,40 + 0,98 = 19,31 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire teórico seco} &= 19,31/0,21 = 91,95 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire total seco} &= 91,95 \times 1,2 = 110,34 \text{ ft}^3 = 99\% \\ \text{Aire total húmedo} &= 110,34/0,99 = 111,4 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Aire total húmedo} = 111,4 \text{ ft}^3/\text{lb de carbón. (36-1)}$$

2.

$$P.C = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 16,39 \text{ ft}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,40 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = H_2O (\text{carbón} + \text{reacción} + \text{humedad aire})$$

$$H_2O = 0,132 \cdot (359/18) + 3,50 \times 2 + (111,4 - 110,34) = 10,69 \text{ ft}^3$$

$$N_2 = N_2 (\text{carbón} + \text{aire})$$

$$N_2 = 110,34 \times 0,79 + 0,011 \cdot (359/28) = 87,48 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ libre} = (110,34 - 91,95) \times 0,21 = 3,86 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total P.C} = 16,39 + 0,40 + 10,69 + 87,48 + 3,86 = 119 \text{ ft}^3$$

Composición de los productos de combustión (36-2)

Gas	Volumen (ft ³)	Composición (%)
CO ₂	16,39	13,4
SO ₂	0,40	0,3
N ₂	87,48	73,7
O ₂	3,86	3,2
H ₂ O	10,69	14,0
	119,00	100,0

3.

$$P.C.B = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S - 1050(9H + W)$$

$$P.C.B = 14600 \times 0,548 + 61000(0,039 - 0,0878) + 4000 \times 0,036 - 1050(9 \times 0,039 + 0,132) = 9346 \text{ BTU}$$

$$\text{Potencia calorífica baja} = 9346 \text{ BTU/lb de carbón (36-3)}$$

4.

Vamos a llevar los volúmenes a peso, para poder usar los valores de la tabla XV del Apéndice
Peso de

$$CO_2 = 16,39 \cdot (44/359) = 2,0 \text{ lbs.}$$

$$H_2O = 10,69 \cdot (18/359) = 0,53 \text{ lbs.}$$

$$SO_2 = 0,40 \cdot (64/359) = 0,07 \text{ lbs.}$$

$$N_2 = 87,48 \cdot (28/359) = 6,82 \text{ lbs.}$$

$$O_2 = 3,86 \cdot (32/359) = 0,34 \text{ lbs.}$$

Utilizando la ecuación #4 y los datos de la columna 4 de la tabla XV del Apéndice, podremos calcular el calor sacado por los gases

$$^{\circ}C = 5/9 \cdot (2200 - 32) = 1204$$

Contenido de calor en.

$$CO_2 = 2,0 \cdot (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 1204) \times 1204 = 627,00 \text{ lbs-cal}$$

$$H_2O = 0,53 \cdot (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \times 1204) \times 1204 = 343,0 \text{ "}$$

$$N_2 = 6,82 \cdot (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1204) \times 1204 = 2157,0 \text{ "}$$

$$O_2 = 0,34 \cdot (0,211 + 1,56 \times 10^{-5} \times 1204) \times 1204 = 94,0 \text{ "}$$

$$SO_2 = 0,07 \cdot (0,139 + 3,1 \times 10^{-5} \times 1204) \times 1204 = 15,0 \text{ "}$$

$$\text{Contenido de calor en los gases} = \underline{3236,0 \text{ Lbs-cal}}$$

$$1 \text{ lb-cal} = 1,8 \text{ BTU}$$

$$\text{Contenido de calor en los gases} = 3236 \times 1,8 = 5825 \text{ BTU}$$

$$\text{Calor perdido en los gases} = 5825/9346 = 0,623$$

$$\text{Calor perdido en los gases} = 62,3\% (36-4)$$

5.

$$\text{Aire exceso} = 110,34 - 91,95 = 18,39 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 18,39 \cdot (29/359) = 1,48 \text{ lbs.}$$

$$\text{Contenido de calor en este} = 1,48 \cdot (0,234 + 1,73 \times 10^{-5} \times 1204) \times 1204 = 454 \text{ lb-cal.}$$

$$\text{Contenido de calor en aire exceso} = 454 \times 1,8 = 817 \text{ BTU}$$

$$\text{Porción de pérdida en aire exceso} = 817/5825 = 0,1403$$

$$\text{Proporción de pérdida en aire exceso} = 14,03\% (36-5)$$

EJERCICIO N°37 (7)

Un carbón bituminoso presenta el siguiente análisis:

C	68%
H	7
O	9
H ₂ O	4
R	12

Este carbón es utilizado en el calentamiento de un horno de reverbero, y los gases productos de la combustión salen del horno a 1200°C

El aire contiene 20 gramos de humedad por metro cubico de aire humedo. Asumir que esta humedad pasa intacta a través del horno.

En el caso (a), el carbón es quemado con 80% de aire en exceso y las cenizas llegan al 14% del peso del carbón.

En el caso (b), se utiliza solamente el 40% de aire exceso y las cenizas contienen 1% de carbono.

PREGUNTAS

1. Comparar, para los dos casos, la pérdida de calor representada por el poder de calentamiento del carbono sin quemar más el calor sacado por los productos de combustión caliente...

SOLUCION

1.

Caso (a):

U.C = cenizas - R

$$U.C = 0,14 - 0,12 = 0,02 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,68 - 0,02 = 0,66 \text{ Kg.}$$

$$\text{Calor perdido en U.C} = 0,02 \times 8100 = 162 \text{ Kcal.}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,66 \cdot (22,4/12) = 1,232 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,07 \cdot (22,4/4) = 0,392 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,09 \cdot (22,4/32) = 0,063 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 1,232 + 0,392 + 0,063 = 1,561 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 1,561/0,21 = 7,434 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 7,434 \times 1,8 = 13,381 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso seco} = 13,381 - 7,434 = 5,947 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ en 1 m}^3 \text{ de aire humedo} = 20 \text{ g (1Kg/1000g)} (22,4 \text{ m}^3/18 \text{ Kg.}) = 0,025 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco en 1 m}^3 \text{ de aire humedo} = 1 - 0,025 = 0,975 \text{ m}^3$$

El aire humedo está compuesto por 97,5% de aire seco y 2,5% de humedad.

$$H_2O \text{ en aire humedo} = 13,381 \cdot (2,5/97,5) = 0,343 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total humedo} = 13,381 + 0,343 = 13,724 \text{ m}^3$$

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2 + O_2$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,232 \text{ m}^3$$

$$H_2O = H_2O (\text{carbón} + \text{reacción} + \text{humedad})$$

$$H_2O = 0,04 \cdot (22,4/18) + 0,392 \times 2 + 0,343 = 1,177 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 13,381 \times 0,79 = 10,571 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ exceso} = 5,947 \times 0,21 = 1,249 \text{ m}^3$$

$$N_2 + O_2 = 10,571 + 1,249 = 11,82 \text{ m}^3$$

Aplicando la ecuación (4) y valores de la tabla XV del Apéndice, podremos calcular el contenido de calor sacado por los gases calientes a 1200°C:

$$N_2 + O_2 = 11,82 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} \times 1200) \times 1200 = 4658 \text{ Kcal.}$$

$$H_2O = 1,177 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 612 \text{ Kcal.}$$

$$CO_2 = 1,232 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 760 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Pérdida total de calor en gases} = 4658 + 612 + 760 = 6030 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Pérdida total de calor} = 6030 + 162 = 6192 \text{ Kcal. (37-1.a)}$$

Caso (b)

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$\frac{3}{3} \quad \frac{2}{3} \quad \frac{1}{3}$$

$$U.C = 0,12 \cdot \left\{ \left(\frac{1}{3} \right) + \left(\frac{2}{3} \right) \right\} = 0,06 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,68 - 0,06 = 0,62 \text{ Kg.}$$

$$\text{Pérdida de calor en U.C} = 0,06 \times 8100 = 486 \text{ Kcal}$$

Calculo del oxígeno para el aire teórico:

$$O_2 \text{ del C} = 0,62 (22,4/12) = 1,157 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,07 \cdot (22,4/4) = 0,392 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico} = 1,157 + 0,392 - 0,063 = 1,486 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 1,486/0,21 = 7,076 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco} = 7,076 \times 1,4 = 9,906 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso seco} = 9,906 - 7,076 = 2,83 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ en aire humedo} = 9,906 \cdot (2,5/97,5) = 0,254 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ en P.C} = 0,04 \cdot (22,4/18) + 0,392 \times 2 + 0,254 = 1,088 \text{ m}^3$$

$$N_2 + O_2 = 9,906 \times 0,79 + 2,83 \times 0,21 = 8,42 \text{ m}^3$$

El contenido de calor en los P.C calientes será

$$N_2 + O_2 = 8,42 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 3318 \text{ Kcal.}$$

$$H_2O = 1,088 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 565 \text{ Kcal.}$$

$$CO_2 = 1,157 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 714 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor que sale en los P.C} = 3318 + 565 + 714 = 4597 \text{ Kcal}$$

$$\text{Pérdida total de calor} = 4597 + 486 = 5083 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Pérdida total de calor} = 5083 \text{ Kcal. (37-1.b)}$$

EJERCICIO N°38 (7)

Se ha planeado la instalacion de un horno, y se han puesto en consideracion los aspectos economicos de varios tipos de hornos. En uno de los tipos investigados, se ha utilizado como combustible un gas natural de la siguiente composicion, con 10% de aire en exceso

CO	0,58%	C ₂ H ₆	7,92%
H ₂	29,03	C ₂ H ₄	0,98
CH ₄	60,70	N ₂	0,79

El horno tipo B utilizó como combustible un carbón bituminoso de la siguiente composicion, con 50% de aire en exceso.

C	73,00%	O	9,70%
H	5,20	H ₂ O	3,20
N	1,40	R	6,75
S	0,75		

El aire utilizado para la combustion en cada caso contenia 35 g. de humedad por metro cubico de aire humedo, medido a las condiciones bajo las cuales entra al horno. El aire entra a 20°C y 770 mm de presión.

PREGUNTAS

1. ¿Cuántos kilogramos de carbon son necesarios para proveer el mismo calor a los procesos con un metro cubico de gas, despreciando el calor contenido en el aire?
2. Calcular la cantidad de aire (condicione dadas), requerido por cada proceso para obtener el mismo poder de calentamiento que en la pregunta 1.
3. Si los productos de combustion de horno a gas entran a la chimenea a 1000°C, ¿cómo sería el calor perdido en estos gases comparado con la potencia calorifica del gas quemado a 200°C?

como sería el calor perdido en los gases de chimenea comparado con la potencia calorífica en el caso del horno a carbón?

SOLUCION

1.

Primero calculamos la potencia calorífica del gas, con los datos proporcionados por la tabla I del Apéndice:

$$\text{CO} = 3034 \times 0,0058 = 17,60 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 2582 \times 0,2903 = 749,55$$

$$\text{CH}_4 = 8560 \times 0,607 = 5195,92$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 15110 \times 0,0792 = 1196,71$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 14480 \times 0,0098 = 141,90$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 17,60 + 749,55 + 5195,92 + 1196,71 + 141,90 = 7301,68 \text{ Kcal/m}^3$$

Determinamos la potencia calorífica del carbón:

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000(\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 586(9\text{H} + \text{W})$$

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,73 + 34000(0,052 - 0,097/8) + 2200 \times 0,0075 - 586(9 \times 0,052 + 0,032) = 6997 \text{ Kcal.}$$

El razonamiento consiste en determinar cuantos kilogramos de carbón producirían 7302 Kcal, si

1 Kg. produce 6997 .

$$\text{Carbon} = 7302/6997 = 1,044 \text{ Kg.}$$

Serían necesarios 1,044 Kg. de carbón (38-1)

2.

Caso A.

Debemos calcular el aire sobre la base de las reacciones que se muestran en el siguiente cuadro:

Reacciones	O ₂ + Productos gaseosos (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	H ₂ O	CO ₂	N
2CO + O ₂ = 2CO ₂	0,0029	---	0,0058	---
2H ₂ + O ₂ = 2H ₂ O	0,1452	0,2903	---	---
CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	1,2140	1,2140	0,6070	---
C ₂ H ₆ + 3,5 O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	0,2772	0,2376	0,1584	---
C ₂ H ₄ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	0,0294	0,0196	0,0196	---
	---	---	---	0,0079
Totales	1,6687	1,7615	0,7908	0,0079

$$\text{Aire teórico a C.N} = 1,6687/0,21 = 7,946 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco a C.N} = 7,946 \times 1,1 = 8,741 \text{ m}^3$$

Cambiamos a las condiciones de entrada del aire:

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 770 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K} \quad T_2 = 293 \text{ K}$$

$$V_1 = 8,741 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 8,741 \cdot (760/273) \cdot (293/770) = 9,26 \text{ m}^3 \text{ de aire seco a C.D.}$$

Cálculo del aire húmedo:

Sea X = m³ de aire húmedo C.D

$$\text{Humedad} = 35\text{X g (1 Kg. 1000 g)} (22,4 \text{ m}^3 / 18 \text{ Kg}) = 0,0436\text{X m}^3$$

$$\text{Aire seco C.D} = X - 0,0436\text{X} = 0,9564\text{X} = 9,26 \text{ m}^3 \therefore$$

$$\text{X = aire húmedo C.D} = 9,26/0,9564 = 9,682 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo C.D} = 9,682 \text{ m}^3 \text{ (38-2)}$$

Caso B.

Peso total del carbón = 1,044 Kg.

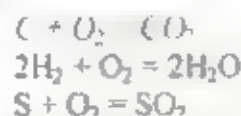
$$\text{C} = 1,044 \times 0,73 = 0,762 \text{ Kg.}$$

$$\text{H} = 0,052 = 0,545 \text{ "}$$

$$\text{N} = 0,014 = 0,01462 \text{ "}$$

$$\begin{aligned} \text{S} &= 0,0075 = 0,00785 \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,032 = 0,035 \\ \text{R} &= 0,0765 = 0,0706 \end{aligned}$$

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno del aire teórico seco C.N

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ del C} &= 0,762 \cdot (22,4/12) = 1,43 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del H} &= 0,0545 \cdot (22,4/4) = 0,305 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del S} &= 0,00785 \cdot (22,4/32) = 0,0055 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del carbón} &= 1,044 \cdot 0,092 \cdot (22,4/32) = 0,0715 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ para el aire teórico} &= 1,43 + 0,305 + 0,0055 + 0,0715 = 1,669 \text{ m}^3 \\ \text{Aire teórico seco C.N} &= 1,669/0,21 = 7,95 \text{ m}^3 \\ \text{Aire total seco C.N} &= 7,95 \cdot 1,5 = 11,93 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cambio de condiciones:

$$\begin{aligned} V_2 &= 11,93 \cdot (760/273) \cdot (293/770) = 12,64 \text{ m}^3 \\ \text{Aire húmedo} &= 12,64/0,9564 = 13,22 \text{ m}^3 \\ \text{Aire húmedo C.D} &= 13,22 \text{ m}^3 \quad (38-2) \end{aligned}$$

3
Caso A

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O total} &= 0,0436 \cdot 9,682 + 1,7615 = 2,174 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ exceso} &= (8,741 - 7,946) \cdot 0,21 = 0,167 \text{ m}^3 \\ \text{N}_2 \text{ total} &= 8,741 \cdot 0,79 + 0,0079 = 6,913 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

El contenido de calor de los P.C a 1000°C será

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 0,7908 \cdot (0,406 + 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) \cdot 1000 = 392 \text{ Kcal.} \\ \text{N}_2 \text{ y O}_2 &= 7,08 \cdot (0,302 + 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) \cdot 1000 = 2293 \text{ Kcal.} \\ \text{H}_2\text{O} &= 2,17 \cdot (0,373 + 5,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) \cdot 1000 = 918 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor total sacado por los P.C} &= 392 + 2293 + 918 = 3603 \text{ Kcal.} \\ \text{Pérdidas de calor} &= 3603/7301,68 = 0,493 \\ \text{Pérdidas de calor} &= 49,3\% \text{ de la P. Calorífica} \quad (38-3) \end{aligned}$$

Caso B

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O total} &= 13,22 \cdot 0,0436 + 0,035 \cdot (22,4/18) + 0,305 \cdot 2 = 1,23 \text{ m}^3 \\ \text{N}_2 \text{ total} &= 0,01462 \cdot (22,4/28) + 11,93 \cdot 0,79 = 9,44 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 &= (11,93 - 7,95) \cdot 0,21 = 0,84 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del calor que sale en los gases:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ y SO}_2 &= 1,4355 \cdot (0,406 + 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) \cdot 1000 = 712 \text{ Kcal.} \\ \text{N}_2 \text{ y O}_2 &= 10,28 \cdot (0,302 + 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) \cdot 1000 = 3331 \text{ Kcal} \\ \text{H}_2\text{O} &= 1,23 \cdot (0,373 + 5,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1000) \cdot 1000 = 520 \text{ Kcal.} \\ \text{Total calor sacado en los gases} &= 712 + 3331 + 520 = 4563 \text{ Kcal} \\ \text{Pérdidas de calor} &= 4563/7301,68 = 0,625 \\ \text{Pérdidas de calor} &= 62,5\% \text{ de la P.C.B del carbón} \quad (38-3) \end{aligned}$$

EJERCICIO N°39 (7)

Un carbón pulverizado utilizado en un horno de reverbero fue analizado como sigue

C	68,8%	H ₂ O	3,2%
H	6,4	R	13,2
O	8,4		

El carbón es quemado con 40% de aire en exceso. Asumir que el carbón entra al horno a 0°C y el aire a 60°C. Los productos de combustión salen del horno a 200°C.
Asumir que el calor específico medio del SiO₂ es $0,18 + 8,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del carbón.
2. El calor suministrado al horno, por kilogramo de carbón.
3. El porcentaje de este calor que es sacado del horno en:
 - (a) los productos de combustión, excluyendo el aire en exceso.
 - (b) El aire en exceso.
 - (c) Las cenizas (asumiendo que están compuestas por SiO_2 , y que dejan el horno a la misma temperatura que los gases productos de la combustión).
4. Si el horno quema 2,5 toneladas métricas de carbón por hora, ¿cuántos cables la caldera pueden ser desarrollados, por el paso de los gases a través de una caldera para pérdidas de calor, con una eficiencia térmica del 65%?

SOLUCION

1.

Si no se especifica otra cosa, siempre que se hable de potencia calorífica, nos estaremos refiriendo a la potencia calorífica baja (P.C.B).

$$P.C.B = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W)$$

$$P.C.B = 8100 \times 0,688 + 34000(0,064 - 0,084/8) + 0 - 586(9 \times 0,064 + 0,032) = 7036 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia Calorífica Baja} = 7036 \text{ Kcal/Kg. (39-1)}$$

2.

El calor suministrado al horno, vamos a representarlo así:

$$Q = P + n + m, \text{ donde:}$$

Q = calor suministrado a horno

P = potencia calorífica

n = Calor sensible en el combustible = 0

m = Calor sensible en el aire.

Cálculo del aire:



$$O_2 \text{ del C} = 0,688 \cdot (22,4/12) = 1,284 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,064 \cdot (22,4/4) = 0,3584 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del carbón} = 0,084 \cdot (22,4/32) = 0,059 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 1,284 + 0,3584 + 0,059 = 1,5834 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico(C.N)} = 1,5834/0,21 = 7,54 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total C.N} = 7,54 \times 1,4 = 10,556 \text{ m}^3$$

Si utilizamos los datos de la tabla XV para el calor específico del aire y los introducimos en la ecuación (4), tendremos:

$$m = 10,556 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 60) \times 60 = 193 \text{ Kcal} \dots$$

$$Q = 7036 + 193 = 7229 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor suministrado por Kg. de carbón} = 7229 \text{ Kcal. (39-2)}$$

3.

Caso a:

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2(\text{aire teórico})$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 1,284 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 0,3584 \times 2 + 0,032 \cdot (22,4/18) = 0,7568 \text{ m}^3$$

$$N_2 (\text{aire teórico}) = 7,45 \times 0,79 = 5,96 \text{ m}^3$$

De nuevo, aplicando a la ecuación (4) los datos de la tabla XV del Apéndice, tendremos los contenidos de calor de c/u de estos gases:

$$CO_2 = 1,284 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 792 \text{ Kcal.}$$

$$H_2O = 0,7568 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 393 \text{ Kcal.}$$

$$N_2 = 5,96 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 2349 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor que sale en los P.C (sin aire exceso)} = 792 + 393 + 2349 = 3534 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor que sale en estos} = 3534/7229 = 0,489$$

$$\text{Calor que sale en los P.C} = 48,9\% \text{ (39-3.a)}$$

Caso b:

$$\text{Aire exceso} = 10,556 - 7,54 = 3,016 \text{ m}^3$$

$$\text{Calor sensible en este} = 3,016 (0,392 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 1189 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor que sale en aire exceso} = 1189/7229 = 0,165$$

$$\text{Calor sacado por aire exceso} = 16,5\% (39-3,b)$$

Caso c:

$$\text{Cenizas} = \text{SiO}_2 = R = 0,132 \text{ Kg./Kg. de carbón.}$$

$$\text{Calor sacado por las cenizas} = 0,132 (0,18 + 8,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 44 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor sacado por las cenizas} = 44/7229 = 0,006$$

$$\text{Calor sacado por las cenizas} = 0,6\% (39-3,c)$$

4.

$$1 \text{ caballo-caldera} = 8440 \text{ Kcal./hr.}$$

$$\text{Carbón total} = 2,5 \text{ ton.} = 2500 \text{ Kg.}$$

Volvemos a calcular los productos de combustión para esta nueva referencia.

$$\text{N}_2 \text{ total} = 10,556 \times 0,79 \times 2500 = 20848,1 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 (\text{aire exceso}) = 3,016 \times 0,21 \times 2500 = 1583,4 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 + \text{O}_2 = 20848,1 + 1583,4 = 22431,5 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 1,284 \times 2500 = 3210 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,7568 \times 2500 = 1892 \text{ m}^3$$

Contenido de calor en estos gases:

$$\text{CO}_2 = 3210 (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 1'980.545 \text{ Kcal.}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1892 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 983.083$$

$$\text{N}_2 + \text{O}_2 = 22431,5 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1200) \times 1200 = 8'839.806$$

$$\text{Total calor en P C} = 1'980.545 + 983.083 + 8'839.806 = 11'803.434 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor utilizado en la caldera} = 11'803.434 \times 0,65 = 7'672.232 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Caballo-caldera desarrollados} = 7'672.232/8440 = 909$$

$$\text{Caballos-caldera desarrollados a pasar los gases} = 909 (39-4)$$

EJERCICIO N°40 (7)

Un horno open-hearth quema un gas de un productor de gas, el cual tiene la siguiente composición, usando 9000 metros cúbicos de gas por hora (medidos a 300°C):

CO	22,0%	CH ₄	3,3%
-CO ₂	5,7	H ₂ O	2,6
H ₂	10,5	N ₂	55,9

El gas es quemado con 20% de aire en exceso. Este gas entra a las puertas del horno a 300°C y el aire utilizado para la combustión a 800°C.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de aire utilizado para quemar un metro cúbico de gas, ambos medidos a la temperatura dada.
2. La composición de los productos de combustión
3. La potencia calorífica del gas, en kilocaloría por metro cúbico y en Btu por pie cúbico.
4. La cantidad de calor suministrado al horno por minuto, en kilocalorías.

SOLUCION

1.

Para calcular el aire necesario para quemar 1 m³ de gas, utilizaremos la tabla siguiente

Reacciones	O ₂ + P.C (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂
2CO + O ₂ = 2CO ₂	0,1100	---	0,2200	---
CO ₂	---	---	0,0570	---
2H ₂ + O ₂ = 2H ₂ O	0,0525	0,1050	---	---
CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	0,0660	0,0660	0,0330	---
H ₂ O	---	0,026	---	---
N ₂	---	---	---	0,559
Totales	0,2285	0,1970	0,3100	0,559

$$\text{Aire teórico} = 0,2285/0,21 = 1,0881 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 1,0881 \times 1,2 = 1,306 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones:

$$V_1 = 1,396 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$T_1 = 300 + 273 = 573 \text{ K} \quad T_2 = 800 + 273 = 1073 \text{ K}$$

$$V_2 = V_1 \cdot (T_2/T_1)$$

$$V_2 = 1,306 \cdot (1073/573) = 2,45 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire a C.D} = 2,45 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas. (40-1)}$$

2.

Productos de combustión = CO₂ + H₂O + N₂ + O₂

$$\text{N}_2 \text{ total} = 1,306 \times 0,79 + 0,559 = 1,591 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ aire exceso} = (1,306 - 1,088) \times 0,21 = 0,0458 \text{ m}^3$$

Composición de los P.C (40-2)

Gas	Volumen (m ³)	Composición (%)
N ₂	1,591	74,2
O ₂	0,0458	2,1
CO ₂	0,310	14,5
H ₂ O	0,197	9,2
	2,1438	100,0

3.

Para la potencia calorífica del gas, utilizamos los datos de la Tabla L del Apéndice:

$$\text{CO} = 0,22 \times 3034 = 667,48 \text{ Kcal.}$$

$$\text{H}_2 = 0,105 \times 2582 = 271,11 \text{ "}$$

$$\text{CH}_4 = 0,033 \times 8560 = 282,48 \text{ "}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 667,48 + 271,11 + 282,48 = 1221,07$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 1221 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (40-3)}$$

Vamos a realizar una conversión de unidades:

$$1 \text{ ft}^3 = 0,02832 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ Kcal} = 3,968 \text{ BTU}$$

$$\text{P.C.B} = 1221 \text{ (Kcal/m}^3) \cdot (0,02832 \text{ m}^3/1 \text{ ft}^3) \cdot (3,968 \text{ BTU/1 Kcal}) = 137,2$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 137,2 \text{ BTU/ft}^3 \text{ (40-3)}$$

Nota: A este mismo resultado se puede llegar, haciendo el compute sobre la base de la Tabla L del Apéndice.

4.

El calor suministrado al horno = Potencia Calorífica + Calor sensible en el gas que entra a 300°C + Calor sensible en el aire a 800°C.

Potencia calorífica del gas.

$$\text{CO} = 9000 \times 0,22 \times 3034 = 6'007.320 \text{ Kcal/hr.}$$

$$\text{H}_2 = 9000 \times 0,105 \times 2582 = 2'439.990 \text{ "}$$

$$\text{CH}_4 = 9000 \times 0,033 \times 8560 = 2'542.320 \text{ "}$$

$$\text{P.C.B} = 6'007.320 + 2'439.990 + 2'542.320 = 10'989.630 \text{ Kcal/hr}$$

Calor sensible en el gas:

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 9000 \times 0,779 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 609078,4 \text{ Kcal/hr}$$

$$\text{CO}_2 = 9000 \times 0,057 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 66638,7 \text{ "}$$

$$\text{H}_2 = 9000 \times 0,105 \times (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 87034,5 \text{ "}$$

$$\text{CH}_4 = 9000 \times 0,033 \times (0,380 + 2,1 \times 10^{-4} \times 300) \times 300 = 39471,3 \text{ "}$$

$$H_2O = 9000 \times 0,026 \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-4} \times 300) \times 300 = 27237,6$$

$$\text{Calor sensible en el gas} = 829460,5 \text{ Kcal/hr}$$

Calor sensible en el aire:

$$\text{Aire total} = 1,306 \times 9000 = 11754 \text{ m}^3$$

$$\text{Calor} = 11754 (0,302 + 2,2 \times 10^{-4} \times 800) \times 800 = 3'005'263 \text{ Kcal/hr}$$

$$\text{Calor suministrado} = 10'989'630 + 829'460 + 3'005'263 = 14'824'353 \text{ Kcal/hr}$$

$$\text{Calor suministrado} = 14'824'353/60 = 247071 \text{ Kcal/min.}$$

$$\text{Calor suministrado al horno} = 247.071 \text{ Kcal/min. (40-4)}$$

EJERCICION N°41 (7)

Un gas natural de Galveston, Tex., presenta el siguiente análisis:

CH ₄	92,00%	CO ₂	0,27%
H ₂	2,20	H ₂ S	0,10
C ₂ H ₄	0,50	O ₂	0,24
CO	0,56	N ₂	4,13

Este gas es utilizado como combustible en un horno para aceros open-hearth. El aire suministrado para la combustión se encuentra a una presión de 780 mm, una temperatura de 40°C y contiene 1,5% de humedad. Se utilizó 10% de aire en exceso.

Los productos de combustión entran a la chimenea a 500°C.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire húmedo realmente utilizado a las condiciones dadas, para la combustión de un metro cúbico de gas, medido a las condiciones normales
2. El volumen de los productos de combustión por metro cúbico de gas quemado (condiciones normales).
3. La potencia calorífica del gas, y el calor perdido en los gases que salen
4. Si el aire hubiera sido precalentado a 1000°C, ¿cuál hubiera sido el calor total introducido al horno por metro cúbico de gas?

SOLUCION

1.

Las reacciones, el oxígeno consumido y los productos de las reacciones se presentan en la siguiente tabla:

Reacciones	O ₂ + P.C (m ³ m ³ de gas)				
	O ₂	CO	H ₂ O	SO ₂	N ₂
CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O	1,8400	0,9200	1,840	---	---
2H ₂ + O ₂ → 2H ₂ O	0,0110	---	0,022	---	---
C ₂ H ₄ + 3O ₂ → 2CO ₂ + 2H ₂ O	0,0150	0,0100	0,010	---	---
2CO + O ₂ → 2CO ₂	0,0028	0,0056	---	---	---
H ₂ S + 1 1/2 O ₂ → H ₂ O + SO ₂	0,0015	---	0,001	0,001	---
CO ₂	---	0,0027	---	---	---
O ₂	0,0024	---	---	---	---
N ₂	---	---	---	---	---
Totales	1,8727	0,9383	1,873	---	---

$$\text{Aire teórico seco (C/N)} = (1,8727 - 0,0024)/0,21 = 8,91 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total seco (C.N)} = 8,91 \times 1,1 = 9,801 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire humedo (C.N)} = 9,801 / 0,985 = 9,95 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones:

$$\begin{aligned} P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 780 \text{ mm} \\ T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 313 \text{ K} \\ V_1 &= 9,95 \text{ m}^3 & V_2 &=? \\ V_2 &= 9,95 \cdot (760/273) \cdot (313/780) = 11,09 \text{ m}^3 \\ \text{Aire realmente utilizado (C.D)} &= 11,09 \text{ m}^3 \quad (41-1) \end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned} \text{P.C} &= \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2 \\ \text{N}_2 \text{ total} &= 9,801 \times 0,79 + 0,0413 = 7,7833 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ (aire exceso)} &= (9,8 - 8,91) \times 0,21 = 0,187 \text{ m}^3 \\ \text{Total H}_2\text{O} &= 9,95 - 9,8 + 1,873 = 2,023 \text{ m}^3 \\ \text{Total P.C} &= 0,001 + 0,9383 + 2,023 + 7,7833 + 0,187 = 10,93 \text{ m}^3 \\ \text{P.C} &= 10,93 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas} \quad (41-2) \end{aligned}$$

3.

la potencia calorifica se calcula con ayuda de los datos de la Tabla L del Apéndice:

$$\begin{aligned} \text{CH}_4 &= 0,92 \times 8560 = 7875 \text{ Kcal.} \\ \text{H}_2 &= 0,022 \times 2582 = 57 \text{ " } \\ \text{C}_2\text{H}_4 &= 0,005 \times 14480 = 72 \text{ " } \\ \text{CO} &= 0,0056 \times 3034 = 17 \text{ " } \\ \text{H}_2\text{S} &= 0,001 \times 5514 = 6 \text{ " } \\ \text{P.C.B} &= 7875 + 57 + 72 + 17 + 6 = 8027 \text{ Kcal.} \\ \text{Potencia calorifica del gas} &= 8027 \text{ Kcal./m}^3 \quad (41-3) \end{aligned}$$

El cálculo de la pérdida de calor en los gases se realiza, introduciendo los datos de la Tabla XV del Apéndice en la ecuación (4):

Contenido de calor en:

$$\begin{aligned} \text{N}_2 \text{ y O}_2 &= 7,97 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 1247 \text{ Kcal.} \\ \text{CO}_2 \text{ y SO}_2 &= 0,9393 (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 212 \\ \text{H}_2\text{O} &= 2,0323 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 403 \\ \text{Calor que sale en P.C} &= 1247 + 212 + 403 = 1862 \text{ Kcal.} \\ \text{Pérdida de calor en P.C al salir} &= 1862 \text{ Kcal.} \quad (41-3) \end{aligned}$$

4

Calor introducido al horno potencia calorifica + precalentamiento a 1000°C (aire seco + humedad del aire)

$$\begin{aligned} \text{Humedad del aire} &= 9,95 - 9,8 = 0,15 \text{ m}^3 \\ \text{Precalentamiento aire seco:} &= 9,8 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 3175 \text{ Kcal.} \\ \text{Precalentamiento humedad:} &= 0,15 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 63 \text{ Kcal.} \\ \text{calor introducido al horno} &= 8027 + 3175 + 63 = 11265 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor introducido} &= 11265 \text{ Kcal./m}^3 \text{ de gas} \quad (41-4) \end{aligned}$$

EJERCICIO N°42 (7)

El carbon pulverizado utilizado en un horno para cemento, tenía la siguiente composición:

C	73,6%	O	10,0%
H	5,3	R	8,5
N	1,2	H ₂ O	0,6
S	0,8		

PREGUNTAS

- la potencia calorifica del carbon, ambas alta (calorimétrica) y baja (práctica).

2 la intensidad calórica, si es quemado completamente con los requerimientos de aire teórico.

3 Si el carbón fue quemado con aire en exceso, y por análisis se encontro que los productos de combustión contenían 4,5% de oxígeno libre, ¿que porcentaje de aire en exceso se utilizó?

4. ¿Cuál sería la intensidad calórica en este caso?

SOLUCION

$$\begin{aligned}
 &1 \\
 P.C.A &= 8100C + 34000(H - 0/8) + 2200S \\
 P.C.A &= 8100 \times 0,736 + 34000(0,053 - 0,1/8) + 2200 \times 0,008 = 7357 \text{ Kcal} \\
 \text{Potencia Calorífica Alta} &= 7357 \text{ Kcal/Kg. de carbón (42-1)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P.C.B &= P.C.A - 586(9H + W) \\
 586(9H + W) &= 586(9 \times 0,053 + 0,006) = 283 \\
 P.C.B &= 7357 - 283 = 7074 \text{ Kcal} \\
 \text{Potencia Calorífica Baja} &= 7074 \text{ Kcal/Kg. (42-1)}
 \end{aligned}$$

2

Cuando ocurre el proceso de combustión, todo el calor introducido y o desarrollado es absorbido por los gases productos de la combustión. Estos pues se calientan a altas temperaturas, dando lugar al fenómeno conocido como "llama".

La temperatura de la llama (intensidad calórica), es la máxima temperatura obtenida en la combustión.

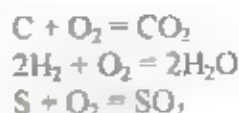
Lo anteriormente dicho, lo podemos expresar matemáticamente de la siguiente manera

Calor total disponible = Calor en los productos de combustión, o
 Potencia calorífica + calor sensible en el combustible + calor sensible en el aire
 = Volumen de los gases x calor específico x temperatura.

$$\text{Temperatura} = \frac{\text{Calor total disponible}}{\text{Volumen de gases} \times \text{Calor específico}} \quad (5)$$

Vamos a aplicar esta ecuación para calcular la intensidad calórica o temperatura de la llama.

Reacciones de combustión:



Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$\begin{aligned}
 O \text{ del } C &= 0,736 \cdot (32/12) = 1,9626 \text{ Kg.} \\
 O \text{ del } H &= 0,053 \cdot (32/4) = 0,424 \text{ Kg.} \\
 O \text{ del } S &= 0,008 \cdot (32/32) = 0,008 \text{ Kg.} \\
 O \text{ del aire teórico} &= 1,9626 + 0,424 + 0,008 = 2,3946 \text{ Kg.} \\
 \text{Aire teórico} &= 2,3946/0,23 = 10,41 \text{ Kg.}
 \end{aligned}$$

$P.C. = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2$

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= 0,736 \cdot (44/12) = 2,6987 \text{ Kg.} \\
 H_2O \text{ total} &= 0,053 \cdot (18/2) + 0,006 = 0,483 \text{ Kg.} \\
 N_2 \text{ total} &= 10,41 \cdot 0,77 + 0,012 = 8,11 \text{ Kg.}
 \end{aligned}$$

Haciendo uso de la Tabla XV del Apéndice

Calor en los productos de combustión:

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= 2,7(0,205 + 4,6 \times 10^{-5}t) \cdot t = 0,5535t + 12,42 \times 10^{-5}t^2 \\
 SO_2 &= 0,016(0,139 + 3,1 \times 10^{-5}t) \cdot t = 0,0022t + 0,05 \times 10^{-5}t^2 \\
 H_2O &= 0,483(0,463 + 6,2 \times 10^{-5}t) \cdot t = 0,2236t + 2,99 \times 10^{-5}t^2 \\
 N_2 &= 8,11(0,241 + 1,8 \times 10^{-5}t) \cdot t = 1,9586t + 14,6 \times 10^{-5}t^2 \\
 \text{Calor en P.C.} &= 2,638t + 29,34 \times 10^{-5}t^2 \\
 7074 &= 2,638t + 29,34 \times 10^{-5}t^2
 \end{aligned}$$

$$t = 2161^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Intensidad calórica (T}^{\circ}\text{ de la llama)} = 2161^{\circ}\text{C (42-2)}$$

3.



$$\text{CO}_2 = 0,736 \cdot (22,4/12) = 1,374 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,053 \cdot (22,4/2) + 0,006 \cdot (22,4/18) = 0,601 \text{ m}^3$$

$$\text{SO}_2 = 0,008 \cdot (22,4/32) = 0,006 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 0,012 \cdot (22,4/28) + 10 \cdot 0,768 \cdot (22,4/28) = 6,154 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C sin aire exceso} = 1,374 + 0,601 + 0,006 + 6,154 = 8,135 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso en P.C} = 4,5/0,21 = 21,43\%$$

$$\text{P.C sin aire exceso} = 100 - 21,43 = 78,57\% = 8,135 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 8,135 \cdot (21,43/78,57) = 2,219 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 10 \cdot (22,4/29) = 7,724 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 2,219/7,724 = 0,287$$

$$\text{Aire exceso} = 28,7\% \text{ (42-3)}$$

4.

La intensidad calórica (temperatura de la llama), la calculamos sobre la base de la ecuación 5) y los datos de la Tabla XV del Apéndice.

Contenido de calor en:

$$\text{N}_2 \text{ y aire exceso} = 8,373 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \quad t = 2,5286 t + 1,8424 \times 10^{-4} t^2$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,601 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \quad t = 0,2242 t + 0,3010 \times 10^{-4} t^2$$

$$\text{CO}_2 \text{ y SO}_2 = 1,38 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \quad t = 0,5603 t + 1,2420 \times 10^{-4} t^2$$

$$\text{Contenido total de calor en los P.C} = 3,3131 t + 3,3850 \times 10^{-4} t^2$$

Así:

$$3,385 \times 10^{-4} t^2 + 3,313 t = 7074 \text{ Kcal}$$

$$t = 1803^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Intensidad calórica} = 1803^{\circ}\text{C (42-4)}$$

EJERCICIO N°43 (7)

El análisis de un coque mostró lo siguiente:

C	89,5%
H	1,1
R	9,4

PREGUNTAS

- La máxima temperatura teórica de la llama cuando el coque es quemado
- Bajo las condiciones teóricas.
- Con 50% de aire en exceso.
- Con 10% de aire en exceso, pero con el aire precalentado a 1000°C .

SOLUCION

1 a.

El calor disponible en este caso lo constituye la potencia calorífica del carbón

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000 \cdot (\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 566 \cdot (9\text{H} + \text{W})$$

$$\text{P.C.B} = 8100 \cdot 0,895 + 34000 (0,011 - 0) + 0 - 566 (9 \cdot 0,011 + 0) = 7565,5 \text{ Kcal}$$

Debemos calcular los productos de combustión, para determinar el calor que ellos contienen.



Reacciones de combustión:



Cálculo del aire teórico:

$$\text{O}_2 \text{ del C} = 0,895 \cdot (22,4/12) = 1,67 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}
 O_2 \text{ del H} &= 0,011 \cdot (22,4/4) = 0,062 \text{ m}^3 \\
 O_2 \text{ para aire teórico} &= 1,67 + 0,062 = 1,732 \text{ m}^3 \\
 \text{Aire teórico} &= 1,732/0,21 = 8,248 \text{ m}^3 \\
 CO_2 &= 1,67 \text{ m}^3 \\
 H_2O &= 2 \times 0,062 = 0,124 \text{ m}^3 \\
 N_2 &= 8,248 \times 0,79 = 6,52 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Contenido de calor en los P.C (ecuación 5 y Tabla XV)

$$\begin{aligned}
 CO_2 &= 1,670 \cdot (0,406 + 0,00009 \text{ t}) \cdot t = 0,6780 \text{ t} + 0,0001500 \text{ t}^2 \\
 H_2O &= 0,124 \cdot (0,373 + 0,00005 \text{ t}) \cdot t = 0,0463 \text{ t} + 0,0000062 \text{ t}^2 \\
 N_2 &= 6,520 \cdot (0,302 + 0,000022 \text{ t}) \cdot t = 1,9690 \text{ t} + 0,0001430 \text{ t}^2 \\
 \text{Total contenido de calor en los P.C} &= 2,6933 \text{ t} + 0,0002992 \text{ t}^2 \\
 0,0002992 \text{ t}^2 + 2,6933 \text{ t} &= 7566 \text{ Kcal} \\
 t &= 2248^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Temperatura de la llama = 2248°C (43-1.a)

1.b.

En este caso, dado que a los productos de combustión del caso anterior se les adiciona un exceso de aire, la temperatura de la llama debe disminuir.

$$\begin{aligned}
 \text{Aire total} &= 8,248 \times 1,5 = 12,372 \text{ m}^3 \\
 \text{Aire exceso} &= 12,372 - 8,248 = 4,124 \text{ m}^3 \\
 \text{Contenido de calor en este} &= 4,124 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \text{ t}) \cdot t = 1,2454 \text{ t} + 0,0000907 \text{ t}^2 \\
 \text{Este valor debe adicionarse al contenido de calor de los P.C encontrado en (a)} \\
 &2,6933 \text{ t} + 0,0002992 \text{ t}^2 \\
 &1,2454 \text{ t} + 0,0000907 \text{ t}^2 \\
 \text{contenido de Calor total} &3,9387 \text{ t} + 0,0003899 \text{ t}^2 \\
 0,0003899 \text{ t}^2 + 3,9387 \text{ t} &= 7566 \text{ Kcal} \\
 t &= 1651^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Temperatura teórica de la llama = 1651°C (43-1.b)

1.c.

En este caso, el contenido de aire en exceso es disminuye y el aire experimenta un calentamiento a 1000°C antes de entrar al horno:

$$\begin{aligned}
 \text{Aire total} &= 8,248 \times 1,1 = 9,0728 \text{ m}^3 \\
 \text{Precalentamiento del aire} &= 9,0728 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 2940 \text{ Kcal} \\
 \text{Total calor disponible} &= 2940 + 7566 = 10506 \text{ Kcal} \\
 \text{Aire exceso} &= 9,0728 - 8,248 = 0,8248 \text{ m}^3 \\
 \text{Contenido de calor de este} &= 0,8248 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \text{ t}) \cdot t = 0,2491 \text{ t} + 0,0000181 \text{ t}^2 \\
 \text{Este valor debe ser adicionado al de los P.C de (a):} \\
 &2,6933 \text{ t} + 0,0002992 \text{ t}^2 \\
 &0,2491 \text{ t} + 0,0000181 \text{ t}^2 \\
 \text{Contenido de calor total en los P.C} &= 2,9424 \text{ t} + 0,0003173 \text{ t}^2 \\
 0,0003173 \text{ t}^2 + 2,9424 \text{ t} &= 10506 \text{ Kcal} \\
 t &= 2753^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Temperatura teórica de la llama = 2753°C (43-1.c)

EJERCICIO N°44 (7)

El gas de un productor de gas presentó el siguiente análisis.

CO	25,2%	CH ₄	4,0%
H ₂	15,3	H ₂ O	2,9
CO ₂	5,0	N ₂	47,6

PREGUNTAS

1. La intensidad calorífica teórica de este gas.
2. La temperatura teórica de la llama si el gas es quemado con 50% de aire en exceso sin precalentamiento.

... lo mismo si el gas es quemado con 10% de aire en exceso, pero ambos, aire y gas son precalentados a 1000°C.

SOLUCION

1.

Debemos calcular el aire teórico y los productos de combustión para 1 m³ de gas, en las condiciones que muestra el cuadro que aparece en la siguiente página.

$$\begin{aligned}\text{Aire teórico} &= 0,2825/0,21 = 1,34 \text{ m}^3 \\ \text{N}_2 \text{ aire} &= 1,34 \times 0,79 = 1,059 \text{ m}^3 \\ \text{Total N}_2 &= 1,059 + 0,476 = 1,535 \text{ m}^3.\end{aligned}$$

Reacciones	O ₂ + P.C (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	
2CO + O ₂ → CO ₂	0,1260	0,252	---	---
2H ₂ + O ₂ → 2H ₂ O	0,0765	---	0,153	---
CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O	0,0800	0,040	0,080	---
CO ₂	---	0,050	---	---
H ₂ O	---	---	0,029	---
N ₂	---	---	---	0,476
Totales	0,2825	0,342	0,262	0,476

Calculamos la potencia calorífica con ayuda de la Tabla L del Apéndice

$$\text{CO} = 0,252 \times 3034 = 765 \text{ Kcal.}$$

$$\text{H}_2 = 0,153 \times 2582 = 385$$

$$\text{CH}_4 = 0,040 \times 8560 = 342$$

$$\text{Potencia calorífica total} = 1502 \text{ Kcal.}$$

Calculamos el contenido de calor en los P.C:

$$\text{CO}_2 = 0,342 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,139 t + 3,078 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,262 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,098 t + 1,310 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{CH}_4 = 1,535 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,464 t + 3,377 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Contenido total de calor en los P.C} = 0,701 t + 7,765 \times 10^{-5} t^2$$

Aplicando la ecuación (5):

$$7,765 \times 10^{-5} t^2 + 0,701 t = 1502 \text{ Kcal.}$$

$$t = 1785^\circ\text{C}$$

$$\text{Intensidad calorífica teórica} = 1785^\circ\text{C (44-1)}$$

2.

En este caso, se adiciona a los P.C, 50% de aire exceso:

$$\text{Aire total} = 1,34 \times 1,5 = 2,01 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 2,01 - 1,34 = 0,67 \text{ m}^3$$

$$\text{Contenido de calor de este} = 0,67 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,202 t + 1,474 \times 10^{-5} t^2$$

Este valor se lo adicionamos al de la pregunta (1):

$$\begin{aligned}\text{Contenido de calor en los P.C} &= 0,202 t + 1,474 \times 10^{-5} t^2 + 0,701 t + 7,765 \times 10^{-5} t^2 = \\ &= 0,903 t + 9,239 \times 10^{-5} t^2.\end{aligned}$$

Aplicando la ecuación (5):

$$1502 \text{ Kcal} = 9,239 \times 10^{-5} t^2 + 0,903 t$$

$$t = 1450^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura teórica de la llama} = 1450^\circ\text{C (44-2)}$$

3

En este caso, el aire a. igual que el gas son precalentados a 1000°C . El aire contiene un exceso de 10%, por tanto el calor aportado al horno aumenta, pero también aumentan los P.C., respecto al caso (1):

$$\text{Total aire} = 1,34 \times 1,1 = 1,474 \text{ m}^3$$

$$\text{Calor por precalentamiento} = 1,474 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 477 \text{ Kcal}$$

Precalentamiento del gas:

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 0,728 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 236 \text{ Kcal.}$$

$$\text{H}_2 = 0,153 (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 49$$

$$\text{CO}_2 = 0,05 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 25$$

$$\text{CH}_4 = 0,04 (0,380 + 21 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 23$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,029 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 13$$

$$\text{Calor por precalentamiento del gas} = 346 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor disponible en el horno} = 1502 + 477 + 346 = 2325 \text{ kcal.}$$

$$\text{Aire exceso} = 1,474 - 1,34 = 0,134 \text{ m}^3$$

$$\text{Contenido de calor de este} = 0,134 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 0,041 t + 0,295 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Contenido de calor en los P.C.} = 0,041 t + 0,295 \times 10^{-5} t^2 + 0,701 t + 7,765 \times 10^{-5} t^2 =$$

$$= 0,742 t + 8,06 \times 10^{-5} t^2$$

$$8,06 \times 10^{-5} t^2 + 0,742 t = 2325 \text{ Kcal}$$

$$t = 2475^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Temperatura teórica de la llama} = 2475^{\circ}\text{C} (44-3)$$

EJERCICIO N°45 (7)

El análisis de un gas natural de Findlay, Ohio, dio como resultado lo siguiente

CH_4	93,35%
H_2	1,64
C_2H_6	0,35
N_2	4,66

Este gas fue quemado con aire (asumido seco) precalentado en regeneradores a 500°C se utilizó 5% de aire en exceso.

PREGUNTAS

1. La intensidad calorífica una vez quemado.
2. ¿Cuánto menor es la temperatura de la llama si no se hace el precalentamiento del aire?
3. Si este gas fuera utilizado en un horno para aceros donde la máxima temperatura de la llama fuera 2100°C ¿a qué temperatura debería ser precalentado el aire para lograr esta temperatura?

SOLUCION

1.

Utilizaremos la ecuación (5) y datos de la Tabla XV del Apéndice para realizar el cálculo de la temperatura.

Como debemos calcular el aire y los productos de combustión, hagamos uso del siguiente cuadro que muestra las reacciones, así como el oxígeno y los productos para 1 m³ de gas quemado

Reacciones	$\text{O}_2 + \text{P.C. (m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas)}$			
	O	CO	H ₂ O	N
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	1,8670	0,9335	8670	---
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	0,0082	---	0,0164	---
$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	0,0105	0,0070	0,0157	---
N_2	---	---	---	0,0466
Total es	1,8857	0,9405	8670	0,0466

El calor aportado al horno está representado por la potencia calorífica del gas y el precalentamiento del aire.

Cálculo de la potencia calorífica:

$$\text{CH}_4 = 0,9335 \times 8560 = 7991 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 0,0164 \times 2582 = 42$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,0035 \times 14480 = 51$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 7991 + 42 + 51 = 8084 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Aire teórico} = 1,8857 / 0,21 = 9,0 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 9 \times 1,05 = 9,45 \text{ m}^3$$

Precalentamiento del aire:

$$9,45 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 1479 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Total calor aportado} = 8084 + 1479 = 9563 \text{ Kcal.}$$

$$\text{P.C} = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 9,45 \times 0,79 + 0,0466 = 7,51 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 9,45 - 9 = 0,45 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ aire exeso} = 0,45 \times 0,21 = 0,0945 \text{ m}^3 \approx 0,1 \text{ m}^3$$

Contenido de calor en los productos de combustión:

$$\text{N}_2 \text{ y O}_2 = 7,61 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \cdot t) \cdot t = 2,30 t + 16,7 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{CO}_2 = 0,9405 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,38 t + 8,5 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,8904 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,71 t + 9,5 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Contenido de calor en los P.C} = 3,39 t + 34,7 \times 10^{-5} t^2$$

$$3,39 t + 34,7 \times 10^{-5} t^2 = 9563 \text{ Kcal. } \therefore$$

$$t = 2290^\circ\text{C}$$

$$\text{Intensidad calorífica} = 2290^\circ\text{C} (45-1)$$

2.

Si no hay precalentamiento, el único calor aportado lo representa la potencia calorífica del gas, entonces:

$$34,7 \times 10^{-5} t^2 + 3,39 t = 8084 \text{ Kcal}$$

$$t = 1982^\circ\text{C}$$

$$\text{La temperatura de la llama será } 2290 - 1982 = 308^\circ\text{C menor}$$

$$\text{Sin precalentamiento, la temperatura de la llama será } 308^\circ\text{C menor (45-2)}$$

3

Para cualquier temperatura, el contenido de calor en los P.C es

$$3,39 t + 34,7 \times 10^{-5} t^2.$$

Si $t = 2100^\circ\text{C}$, entonces:

$$\text{Calor en los P.C} = 3,39 \times 2100 + 34,7 \times 10^{-5} (2100)^2 = 8649 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor por precalentamiento del aire} = 8649 - 8084 = 565 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor del aire a cualquier t :

$$9,45 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 2,85 t + 20,79 \times 10^{-5} t^2, \text{ así:}$$

$$20,79 \times 10^{-5} t^2 + 1,85 t = 565 \text{ Kcal } \therefore$$

$$t = 192,4^\circ\text{C.}$$

$$\text{El aire debe ser precalentado a } 192,4^\circ\text{C (45-3)}$$

EJERCICIO N°46 (7)

Un gas de alto horno utilizado como combustible contiene

CO	30%
CO ₂	14
CH ₄	2
N ₂	54

Se acepta un 10% de aire en exceso para la combustión.

PREGUNTAS

- 1 La máxima temperatura teóricamente obtenible, sin precalentamiento.
- 2 La temperatura a la cual el gas y el aire deben ser precalentados, para producir una llama con temperatura de 3300°F. Asumir que ambos se precalientan a la misma temperatura

SOLUCION

1.

En el cuadro que aparece en la página siguiente se muestran las reacciones que produce 1 m de gas, así como el oxígeno consumido y los gases producidos en la combustión

$$\text{Aire teórico} = 0,19/0,21 = 0,905 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 0,905 \times 1,1 = 0,9955 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 0,9955 - 0,905 = 0,0905 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C} = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{aire exceso.}$$

$$\text{N}_2 + \text{aire exceso} = 0,54 + 0,905 \times 0,79 + 0,0905 = 1,346 \text{ m}^3.$$

Reacciones	O ₂ + P.C (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
CO + 1/2 O ₂ = CO ₂	0,15	0,30	---	---
CO	---	0,14	---	---
CH ₄ + 2 O ₂ = CO ₂ + 2 H ₂ O	0,04	0,02	0,04	---
N ₂	---	---	---	0,54
Totales	0,19	0,46	0,04	0,54

Contenido de calor en los gases a cualquier temperatura.

$$\text{N}_2 + \text{aire exceso} = 1,346 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,4065 t + 3,0 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{CO}_2 = 0,46 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,1868 t + 4,1 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,04 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,0149 t + 0,2 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Contenido total de calor en los P.C} = 0,6082 t + 7,3 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 0,3 \times 3034 + 0,02 \times 8560 = 1081,4 \text{ Kcal.}$$

Aplicando la ecuación (5):

$$7,3 \times 10^{-5} t^2 + 0,6082 t = 1081,4 \text{ Kcal.}$$

$$t = 1505,9^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura teórica de la llama} = 1505,9^\circ\text{C} \quad (46-1)$$

2

$$\text{Temperatura de la llama} = (5/9) \times (3300 - 32) = 1815,6^\circ\text{C.}$$

Cuando $t = 1815,6^\circ\text{C}$, el calor en los P.C será:

$$\text{Calor en los P.C} = 0,6082 \times 1815,6 + 7,3 \times 10^{-5} \times (1815,6)^2 = 1345 \text{ Kcal}$$

Precalentamiento del gas y el aire:

$$\text{N}_2 + \text{CO}_2 = 0,84 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,25368 t + 1,848 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{CO}_2 = 0,14 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,05684 t + 1,260 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{CH}_4 = 0,02 (0,380 + 2,1 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,00760 t + 0,420 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Aire} = 0,9955 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,30064 t + 2,190 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Calor por precalentamiento gas y aire} = 0,61876 t + 5,718 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{El calor aportado al horno ahora es: Potencia calorífica} + \text{precalentamiento} =$$

$$= 0,61876 t + 5,718 \times 10^{-5} t^2 + 1081,4$$

$$1081,4 + 0,61876 t + 5,718 \times 10^{-5} t^2 = 1345 \text{ Kcal}$$

$$t = 410,5^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura de precalentamiento} = 410,5^\circ\text{C} \quad (46-2)$$

EJERCICIO N°47 (7)

El gas de ejercicio #40 es utilizado como combustible en un horno open-heart. Se quema con 15% de aire en exceso, el aire se asume seco.

En regeneradores se precalientan ambos, aire y gas a una temperatura de 500°C

La composicion es:

CO	22,0%	CH ₄	3,3%
CO ₂	5,7	H ₂ O	2,6
H ₂	10,5	N ₂	55,9

PREGUNTAS

1. La temperatura producida por la combustion.
2. La temperatura que seria obtenida si el horno no tuviera regeneradores, el aire y el gas se asume que entran frios.
3. ¿A que temperatura deberia ser el gas precalentado para producir la misma temperatura que en la pregunta (1), sin precalentamiento del aire?

SOLUCION

1.

Recordemos que:

Potencia calorifica + Precalentamiento (aire y/o combustible) = calor en los productos de combustion. Esto es lo que resume la ecuación (5), por tanto nos basaremos en ella para obtener la temperatura de la llama.

Veamos las siguientes reacciones de combustion:

Reacciones	O ₂ + P.C (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
2CO + O ₂ → 2CO ₂	0,1100	0,220	---	---
CO ₂	---	0,056	---	---
2H ₂ + O ₂ → 2H ₂ O	0,0525	---	0,105	---
CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O	0,0660	0,033	0,066	---
H ₂ O	---	---	0,026	---
N ₂	---	---	---	0,559
Totales	0,2285	0,310	0,197	0,559

$$\text{Aire teórico} = 0,2285/0,21 = 1,08 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 1,08 \times 1,15 = 1,242 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} + \text{CO} + \text{N}_2(\text{gas}) = 1,242 + 0,559 + 0,22 = 2,021 \text{ m}^3$$

Precalentamiento del aire y el gas (para el calor especifico, ver Tabla XV del Apéndice):

$$\text{Aire} + \text{CO} + \text{N}_2(\text{gas}) = 2,021 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 316 \text{ Kcal}$$

$$\text{CO}_2(\text{gas}) = 0,057 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 25$$

$$\text{H}_2 = 0,105 \cdot (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 17$$

$$\text{CH}_4 = 0,033 \cdot (0,380 + 21 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 8$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,026 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 5$$

$$\text{Calor total por precalentamiento de aire y gas} = 371 \text{ Kcal}$$

Potencia calorifica del gas (Ver Tabla L del Apéndice).

$$\text{CO} = 0,22 \times 3034 = 668 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 0,105 \times 2582 = 271 \text{ "}$$

$$\text{CH}_4 = 0,033 \times 8560 = 283 \text{ "}$$

$$\text{Potencia calorifica del gas} = 668 + 271 + 283 = 1222 \text{ Kcal m}^3$$

$$\text{Total calor disponible} = 1222 + 371 = 1593 \text{ Kcal.}$$

Vamos a calcular el contenido de calor de los productos de combustion a cualquier temperatura

$$\text{P.C} = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2$$

$$\text{Total N}_2 = 1,242 \times 0,79 + 0,559 = 1,54 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 1,242 - 1,08 = 0,162 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ aire exceso} = 0,162 \times 0,21 = 0,034 \text{ m}^3$$

$$N_2 + O_2 = 1,54 + 0,034 = 1,574 \text{ m}^3$$

Calor en los P.C. a cualquier temperatura

$$N_2 + O_2 = 1,574 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,475 t + 3,46 \times 10^{-5} t^2$$

$$CO_2 = 0,310 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,126 t + 2,79 \times 10^{-5} t^2$$

$$H_2O = 0,197 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,074 t + 0,99 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Calor en los P.C. a cualquier } t = 0,675 t + 7,24 \times 10^{-5} t^2$$

$$1593 \text{ Kcal.} = 0,675 t + 7,24 \times 10^{-5} t^2 \therefore$$

$$t = 1935^\circ C$$

Temperatura producida por la combustión = 1935°C (47-1)

2

Si el aire y/o el gas no experimentan ningún precalentamiento, entonces el calor disponible se limita únicamente a la potencia calorífica del combustible, de modo que la temperatura de la llama será menor

$$1222 = 0,675 t + 7,24 \times 10^{-5} t^2$$

$$t = 1550^\circ C$$

Temperatura de la llama = 1550°C (47-2)

3

Calor por precalentamiento = 371 Kcal.

Contenido de calor del gas a cualquier temperatura:

$$CO + N_2 = 0,779 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,235 t + 1,71 \times 10^{-5} t^2$$

$$CO_2 = 0,057 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,023 t + 0,51 \times 10^{-5} t^2$$

$$H_2 = 0,105 (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,032 t + 0,21 \times 10^{-5} t^2$$

$$H_2O = 0,026 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,010 t + 0,13 \times 10^{-5} t^2$$

$$CH_4 = 0,033 (0,380 + 2,1 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,013 t + 0,69 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Calor en el gas a cualquier temperatura} = 0,313 t + 3,25 \times 10^{-5} t^2$$

$$371 = 0,313 t + 3,25 \times 10^{-5} t^2$$

$$t = 1067^\circ C$$

Temperatura de precalentamiento del gas = 1067°C (47-3)

EJERCICIO N°48 (7)

Un horno de reverbero para refinación utiliza un aceite que contiene:

C	86%
H	14

Este aceite tiene una potencia calorífica de 10932 Kcal/Kg.

Los gases que salieron del horno, presentaron el siguiente análisis

N_2	75.0%	H_2O	10.1%
CO_2	10.3	O_2	4.6

Y poseen una temperatura de 1200°C.

Los gases pasan del horno a una caldera para pérdidas de calor, la cual opera a una eficiencia del 60%. Dejan la caldera a 400°C.

PREGUNTAS

1. El volumen total de los gases que salen del horno por kilogramo de carbon quemado, medido a 1200°C.
2. El porcentaje de la potencia calorífica del aceite que es sacado del horno por los gases.
3. Los kilogramos de agua evaporados en la caldera, por kilogramo de aceite quemado, al equivalente de 539 Kcal. requeridas para evaporar 1 Kg. de agua.

+ el porcentaje del calor dejado por los gases en su paso a través de la caldera, y cuál es utilizado para hacer vapor

SOLUCION

1.
vamos a utilizar la siguiente expresión:

$$m^3 \text{ de gas} = \frac{C \text{ total en gas}}{C_{m^3 \text{ de gas}}} \quad (6)$$

C en 1 Kg. de aceite = 0,86 Kg.

En 1 m³ de gas hay 0,103 m³ de CO₂

$$C / m^3 \text{ de gas} = 0,103 \cdot (12/22,4) = 0,055 \text{ Kg.}$$

$$m^3 \text{ de gas} = 0,86/0,055 = 15,64 \text{ m}^3 \text{ (C.N)}$$

Realizamos el cambio de condiciones:

$$T_1 = 273K \quad T_2 = 1200 + 273 = 1473K$$

$$V_1 = 15,64 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 \cdot (T_2/T_1) :$$

$$V_2 = 15,64 \cdot (1473/273) = 84,2 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total de P.C} = 84,2 \text{ m}^3/\text{Kg. de aceite (48-1)}$$

2.

Productos de combustión por Kg. de aceite quemado:

$$N_2 = 15,64 \times 0,75 = 11,73 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 15,64 \times 0,103 = 1,61 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 15,64 \times 0,101 = 1,58 \text{ m}^3$$

$$O_2 = 15,64 \times 0,046 = 0,72 \text{ m}^3$$

$$\text{Total productos de combustión (C.N)} = 15,64 \text{ m}^3$$

Cálculo del calor que sale en los gases (ver Tabla XV del Apéndice):

$$N_2 + O_2 = 12,45 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1200) \cdot 1200 = 4905 \text{ Kcal}$$

$$CO_2 = 1,61 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1200) \cdot 1200 = 992$$

$$H_2O = 1,58 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1200) \cdot 1200 = 808$$

$$\text{Calor que sale en los productos de combustión} = 6705 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor que sale} = 6705/10932 = 0,613$$

$$\text{Calor que sale en P.C} = 61,3\% \text{ de la P.C.B del aceite (48-2)}$$

3

$$\text{calor efectivo de la caldera} = 6705 \times 0,60 = 4023 \text{ Kcal}$$

$$\text{Kg. de agua evaporados} = 4023/539 = 7,5$$

$$\text{Agua evaporada en la caldera} = 7,5 \text{ Kg. (48-3)}$$

4

Calor sensible de los P.C a 400°C:

$$N_2 + O_2 = 12,45 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 400) \cdot 400 = 1548 \text{ Kcal.}$$

$$CO_2 = 1,61 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 400) \cdot 400 = 284$$

$$H_2O = 1,58 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 400) \cdot 400 = 249$$

$$\text{Total calor sensible de los P.C a 400°C} = 2081 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor efectivo de la caldera} = 6705 \times 0,6 = 4023 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor dejado} = 6705 - 2081 = 4624 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor utilizado en hacer vapor} = 4023/4624 = 0,87$$

$$\text{Calor utilizado en hacer vapor} = 87\% \text{ del calor dejado (48-4)}$$

EJERCICIO N°49 (7)

Un horno regenerativo open hearth utiliza gas como combustible. El gas es quemado con 10% de aire en exceso.

La temperatura del aire y del gas un instante antes de la combustión promedia 800°C, mientras que la temperatura a la entrada de los recuperadores promedia 1400°C y a su salida 600°C. De los regeneradores los productos de combustión pasan a la chimenea.

La composición del gas es la siguiente:

CO	22%	CH ₄	2%
CO ₂	8	H ₂ O	4
H ₂	11	N ₂	53

PREGUNTAS

1. El promedio teórico de la temperatura de la llama.
2. La eficiencia de la regeneración.
3. El porcentaje del calor total que entra al horno que se pierde en los gases de la chimenea, y cual sería este porcentaje si no se usan recuperadores.

SOLUCION

1.

calor disponible = calor en los productos de combustión.

Calor disponible = potencia calorífica - calor por precalentamiento (aire y gas)

Potencia calorífica del combustible:

$$\text{CO} = 0,22 \times 3034 = 667,48 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 0,11 \times 2582 = 284,02$$

$$\text{CH}_4 = 0,02 \times 8560 = 171,20$$

$$\text{Potencia calorífica} = 1122,70 \text{ Kcal.}$$

Cálculo del aire:

Reacciones de Combustión.

$$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2: \quad \text{O}_2 = 0,22/2 = 0,110 \text{ m}^3$$

$$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}: \quad \text{O}_2 = 0,11/2 = 0,055 \text{ m}^3$$

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}: \quad \text{O}_2 = 2 \times 0,02 = 0,040 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire teórico} = 0,205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 0,205/0,21 = 0,976 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 0,976 \times 0,1 = 0,0976 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 0,976 + 0,0976 = 1,0736 \text{ m}^3$$

Productos de combustión = CO₂ + H₂O + N₂ + O₂

$$\text{CO}_2 = 0,08 + 0,22 + 0,02 = 0,32 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,04 + 0,11 + 0,04 = 0,19 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ exceso} = 0,0976 \times 0,21 = 0,02 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 0,53 + 1,0736 \times 0,79 = 1,35 \text{ m}^3$$

Precalentamiento del aire y del gas a 800°C:

$$\text{Aire} + \text{N}_2 + \text{CO} = 1,0736 + 0,53 + 0,22 = 1,8236 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} + \text{N}_2 + \text{CO} = 1,8236 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 800) \cdot 800 = 457 \text{ Kcal.}$$

$$\text{CO}_2 = 0,08 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 800) \cdot 800 = 31$$

$$\text{H}_2 = 0,11 \cdot (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 800) \cdot 800 = 28$$

$$\text{CH}_4 = 0,02 \cdot (0,380 + 21 \times 10^{-5} \times 800) \cdot 800 = 9$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,04 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 800) \cdot 800 = 11$$

$$\text{Calor total del precalentamiento} = 538 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor disponible} = 1123 + 538 = 1661 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor en los productos de combustión a cualquier temperatura

$$N_2 + O_2 = 1,37 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) t = 0,414 t + 0,0000301 t^2$$

$$H_2O = 0,190 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) t = 0,071 t + 0,0000095 t^2$$

$$CO_2 = 0,320 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) t = 0,130 t + 0,0000288 t^2$$

$$\text{Total calor en los productos de combustión } t = 0,615 t + 0,0000684 t^2$$

$$0,0000684 t^2 + 0,615 t = 1661 \text{ Kcal.}$$

$$t = 2175^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura de la llama} = 2175^\circ\text{C} (49-1)$$

2.

En el precalentamiento del aire y del gas se utilizan 538 Kcal.

Calor en el aire y el gas a cualquier temperatura.

$$\text{Aire} + N_2 + CO = 1,8236 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) t = 0,540 t + 0,0000393 t^2$$

$$CO_2 = 0,08 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) t = 0,032 t + 0,0000072 t^2$$

$$H_2 = 0,11 (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} t) t = 0,033 t + 0,0000220 t^2$$

$$CH_4 = 0,02 (0,380 + 21 \times 10^{-5} t) t = 0,008 t + 0,0000042 t^2$$

$$H_2O = 0,04 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) t = 0,015 t + 0,0000020 t^2$$

$$\text{Aire y gas a cualquier temperatura} = 0,628 t + 0,0000549 t^2$$

Cuando $t = 400^\circ\text{C}$:

$$\text{Calor de precalentamiento} = 987,2 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Eficiencia} = 538/987,2 = 0,545$$

$$\text{Eficiencia} = 54,5\% (49-2)$$

3.

Contenido de calor en los P.C a cualquier temperatura = $0,615 t + 0,0000684 t^2$

$$\text{Si } t = 600^\circ\text{C}$$

$$\text{Calor en P.C} = 393 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor perdido} = 393/1661 = 0,237$$

$$\text{Pérdida de calor en gases a } 600^\circ\text{C} = 23,7\% (49-3)$$

Si no hay recuperadores, los gases salen por la chimenea a 1400°C .

$$\text{Si } t = 1400^\circ\text{C:}$$

$$\text{Calor en gases} = 995 \text{ Kcal}$$

$$\text{Pérdida} = 995/1661 = 0,599$$

$$\text{Pérdidas de calor} = 60\% (49-3)$$

EJERCICIO N°50 (7)

La composición de un gas de alto horno es la siguiente:

CO	24%	CO ₂	13%
H ₂	2	H ₂ O	4
N ₂	57		

Este gas es quemado en un horno regenerativo para fundir hierro, utilizando los requerimientos teóricos de aire, el cual contiene 2% de humedad. Tanto el gas como el aire son precalentados a 600°C y se produce una temperatura de combustión de 1600°C .

Por cada 200 kilogramos de hierro fundido, se queman 1000 m^3 de gas.

El calor en el hierro a la temperatura del baño es de 350 Kcal/Kg .

Los productos de combustión al salir del horno (entrada a los regeneradores), la temperatura ha caído a 1100°C y salen de los regeneradores a 500°C (ver figura 1).

PREGUNTAS

1. El porcentaje del calor original disponible que se perdió en la combustión, los porcentajes del mismo utilizados y perdidos en el propio horno, los porcentajes utilizados y perdidos en los regeneradores y el porcentaje perdido en las chimeneas de los gases.
2. Las eficiencias térmicas del propio horno y de los regeneradores.

SOLUCION

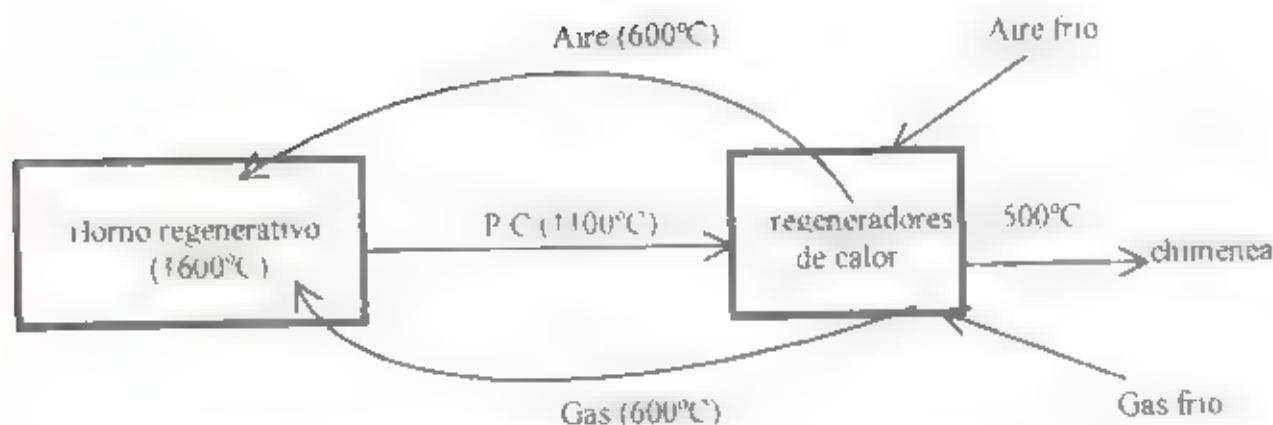


Figura N°1 Horno Regenerativo con Sistema de Recuperacion de Calor

Reacciones de combustión:

$$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2: \quad \text{O}_2 = 0,24 \times 0,5 = 0,12 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}: \quad \text{O}_2 = 0,02 \times 0,5 = 0,01 \text{ m}^3$$

$$\text{Total O}_2 \text{ requerido} = 0,13 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico seco} = 0,13 / 0,21 = 0,619 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico húmedo} = 0,619 \times 1,02 = 0,631 \text{ m}^3$$

$$\text{Humedad del aire} = 0,631 - 0,619 = 0,012 \text{ m}^3$$

Potencia calorífica del gas:

$$\text{CO} = 0,24 \times 3034 = 728,16 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 0,02 \times 2582 = 51,64 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total P.C.B.} = 779,80 \text{ Kcal/m}^3$$

Precalentamientos.

Gas

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 0,81 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 600) \cdot 600 = 153,21 \text{ Kcal}$$

$$\text{CO}_2 = 0,13 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 600) \cdot 600 = 35,91$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,04 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 600) \cdot 600 = 9,72$$

$$\text{H}_2 = 0,02 \cdot (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 600) \cdot 600 = 3,74$$

$$\text{Total precalentamiento del gas} = 202,38 \text{ Kcal/m}^3$$

Aire

$$\text{Aire teórico} = 0,619 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 600) \cdot 600 = 117,10 \text{ Kcal}$$

$$\text{Humedad} = 0,012 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 600) \cdot 600 = 2,92 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total precalentamiento aire húmedo} = 120,02 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor disponible original} = 779,80 + 202,4 + 120 = 1102,2 \text{ Kcal}$$

Productos de combustión = $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$

$$\text{CO}_2 = 0,24 + 0,13 = 0,37 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,02 + 0,04 + 0,012 = 0,072 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 0,57 + 0,619 \times 0,79 = 1,059 \text{ m}^3$$

Calor en productos de combustión a 1600°C:

$$\text{CO}_2 = 0,370 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1600) \cdot 1600 = 325,60 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,072 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1600) \cdot 1600 = 52,20 \text{ Kcal}$$

$$\text{N}_2 = 1,059 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1600) \cdot 1600 = 571,30 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor total en productos de combustión} = 949,10 \text{ Kcal}$$

Calor en productos de combustión a 1100°C:

$$\text{CO}_2 = 0,370 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1100) \cdot 1100 = 205,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,072 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1100) \cdot 1100 = 33,9 \text{ Kcal}$$

$$\text{N}_2 = 1,059 \cdot (0,303 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1100) \cdot 1100 = 380,0 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor en P.C a 1100°C} = 619,4 \text{ Kcal}$$

Calor en productos de combustión a 500°C

$$\text{CO}_2 = 2,370 (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 83,435 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,072 (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 14,325 \text{ Kcal}$$

$$\text{N}_2 = 1,059 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 500) \cdot 500 = 165,736 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor en P.C. a 500°C} = 263,496 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor en hierro fundido por de gas} = 350 (200/1000) = 70 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor original perdido en la combustión} = 1102,2 - 949,1 = 153,1 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor original perdido en la combustión} = 153,1/1102,2 = 0,139$$

$$\text{Calor perdido en combustión} = 13,9\% (50-1)$$

$$\text{Calor utilizado en el horno} = 70/1102,2 = 0,063$$

$$\text{Calor utilizado en el horno} = 6,3\% (50-1)$$

El calor perdido en el propio horno = calor original - calor que sale en P.C. - calor perdido en la combustión - contenido de calor en el hierro fundido.

$$\text{Calor perdido en el horno} = 1102,2 - 619,4 - 153,1 - 70 = 259,7 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor perdido en el horno} = 259,7/1102,2 = 0,235$$

$$\text{Calor perdido en el horno} = 23,5\% (50-1)$$

$$\text{Calor utilizado en los regeneradores para el precalentamiento del aire y el gas} = 120,02 + 202,38 = 322,4 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor utilizado en regeneradores} = 322,4/1102,2 = 0,293$$

$$\text{Calor utilizado en regeneradores} = 29,3\% (50-1)$$

Calor perdido en regeneradores = Calor que entra en los P.C. - calor utilizado en precalentamientos - calor de salida de los P.C.

$$\text{Calor perdido en regeneradores} = 619,4 - 322,4 - 263,4 = 33,6 \text{ Kcal}$$

$$\text{Pérdida en regeneradores} = 33,6/1102,2 = 0,0305$$

$$\text{Pérdida en regeneradores} = 3,05\% (50-1)$$

$$\text{Pérdidas en chimenea} = 263,4/1102,2 = 0,239$$

$$\text{Pérdidas en chimenea} = 23,9\% (50-1)$$

2.

La eficiencia del horno se puede calcular en función del calor total del horno, o en función del calor de combustión:

En función de calor total.

$$\text{Eficiencia} = 70/1102,2 = 0,064$$

$$\text{Eficiencia} = 6,4\% (50-1)$$

En función del calor de combustión:

$$\text{Eficiencia} = 70/949,1 = 0,074$$

$$\text{Eficiencia} = 7,4\% (50-1)$$

$$\text{Eficiencia de los regeneradores} = 322,4/619,4 = 0,521$$

$$\text{Eficiencia de los regeneradores} = 52,1\% (50-1)$$

EJERCICIO N°51 (7)

Un horno para aceros open-hearth de la Bethlehem Steel Co. Es calentado con alquitrán de horno de coque, el cual tiene la siguiente composición

C	87,8%	N	1,1%
H	5,6	S	0,6
O	2,2	H ₂ O	2,7

La gravedad específica del alquitrán es 1,14.

Este alquitrán en el quemador tiene una temperatura de 190°F. y es atomizado con 1,42 libras de vapor por libra de alquitrán.

La temperatura del vapor es de 550°F.

El aire precalentado para la combustión (asumido seco), entra a las puertas a 1900°F.

Los productos de combustión contienen 1,5% de oxígeno, análisis seco. Ellos dejan el horno y entran a los recuperadores de calor a 2750°F.

Assumir que el calor específico del alquitrán es 0,24.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica neta del alquitrán, en BTU/galón
2. Los pies cúbicos de aire seco a condiciones normales utilizados por libra de alquitrán, y el porcentaje de aire en exceso, asumiendo que toda la combustión es por aire (v.g. despreciando la combustión por vapor)
3. El calor total suministrado al horno, por libra de alquitrán quemado.
4. El calor sacado del horno por los gases calientes, incluyendo el vapor con estos gases, pero despreciando los gases resultantes de la carga en el horno
5. La eficiencia de regeneración de los recuperadores, considerando solamente el calor en los gases, como en la pregunta 4. y asumiendo que los recuperadores calientan los gases que entran a 1900°F
6. La temperatura máxima de la llama en los quemadores.

SOLUCION

1.

Para este cálculo utilizamos la fórmula de Dulong, en la forma

$$\text{BTU/lb} = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S = 1050(9H + W)$$

$$\text{BTU/lb} = 14600 \times 0,878 + 61000(0,056 - 0,022/8) + 4000 \times 0,006 = 1050(9 \times 0,056 + 0,027)$$

$$\text{BTU/lb} = 15533,5$$

$$1 \text{ galón} = 10,142 \text{ lbs.}$$

$$\text{BTU/galón} = 15533,5 \times 10,142 = 157541$$

$$\text{BTU/galón} = 157541 \text{ (51-1)}$$

2.

Reacciones de combustión:

$$C + O_2 = CO_2: \quad O_2 = 0,878 \cdot (359/12) = 26,267 \text{ ft}^3$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O: \quad O_2 = 0,056 \cdot (359/4) = 5,026$$

$$S + O_2 = SO_2: \quad O_2 = 0,006 \cdot (359/32) = 0,067 \text{ ft}^3$$

$$\text{Oxígeno de reacciones:} \quad = 31,360 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ aire teórico} = 31,26 - 0,022 \cdot (359/32) = 31,113 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 31,113/0,21 = 148,157 \text{ ft}^3$$

$$\text{P.C sin aire exceso} = CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2$$

$$N_2 = 148,157 \times 0,79 + 0,011 \cdot (359/28) = 117,185 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 2 \times 5,026 + 0,027 \cdot (359/18) = 10,591 \text{ ft}^3$$

$$CO_2 = O_2 \text{ del C} = 26,267 \text{ ft}^3$$

$$SO_2 = O_2 \text{ del S} = 0,067 \text{ ft}^3$$

$$\text{P.C total sin aire exceso} = 154,110 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso en productos de combustión} = 1,5/0,21 = 7,14\%$$

$$\text{P.C sin aire exceso} = 100 - 7,14 = 92,86\% = 154,110 \text{ ft}^3$$

$$\text{P.C total} = 154,110/0,9286 = 165,96 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 165,96 - 154,11 = 11,85 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 148,157 + 11,85 = 160,007 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 160 \text{ ft}^3/\text{lb. De alquitrán (51-2)}$$

$$\text{Aire exceso} = 11,85/160,007 = 0,074$$

$$\text{Aire exceso} = 7,4\% \text{ (51-2)}$$

3.

Conversion de temperaturas: °F → °C:

$$^{\circ}\text{C} = (5/9) \times (^{\circ}\text{F} - 21)$$

$$190^{\circ}\text{F} = 87,8^{\circ}\text{C}$$

$$550^{\circ}\text{F} = 287,8^{\circ}\text{C}$$

$$1900^{\circ}\text{F} = 1037,8^{\circ}\text{C}$$

$$2750^{\circ}\text{F} = 1510^{\circ}\text{C}$$

Precalentamientos

Recordar la ecuación (4):

Contenido de calor = cantidad \times calor específico \times temperatura.

Precalentamiento Alquitrán = $1 \times 0,24 \times 87,8 = 21,072 \text{ lb-cal}$ ($1,83 \text{ BTU/lb-cal}$) = $37,93 \text{ BTU}$

Precalentamiento Vapor = $0,42 (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \times 287,8) \times 287,8 \times 1,8 = 104,62 \text{ BTU}$

Aire = $160 \text{ ft}^3 \times (29 \text{ lb}/359 \text{ ft}^3) = 12,92 \text{ lb}$

Precalentamiento aire = $12,92 (0,234 + 1,73 \times 10^{-5} \times 1037,8) \times 1037,8 \times 1,8 = 6081 \text{ BTU}$

Potencia calorífica = $1 \times 15533,5 = 15533,5 \text{ BTU}$

Calor total suministrado = $37,93 + 104,62 + 6081 + 15533,5 = 21757,05$

Calor total suministrado = $21757 \text{ BTU/lb. Alquitrán (51-3)}$

4

Productos de combustión:

$\text{H}_2\text{O total} = 10,591 + 0,42 \cdot (359/18) = 18,968 \text{ ft}^3 = 0,951 \text{ lb}$

$\text{CO}_2 = 26,267 \cdot (44/359) = 3,219 \text{ lb}$

$\text{SO}_2 = 0,067 \cdot (64/359) = 0,012 \text{ lb}$

$\text{N}_2 = 117,185 + 11,65 \times 0,79 = 126,547 \text{ ft}^3 = 9,870 \text{ lb}$

$\text{O}_2 = 11,85 \times 0,21 = 2,489 \text{ ft}^3 = 0,222 \text{ lb}$

Calor sacado en los P.C a 2570°F (1510°C):

$\text{CO}_2 = 3,219 (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 1510) \times 1510 = 1334 \text{ lb-cal/lb}$

$\text{H}_2\text{O} = 0,951 (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \times 1510) \times 1510 = 799 \text{ "}$

$\text{SO}_2 = 0,012 (0,139 + 3,1 \times 10^{-5} \times 1510) \times 1510 = 3,4 \text{ "}$

$\text{N}_2 = 9,870 (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1510) \times 1510 = 3997 \text{ "}$

$\text{O}_2 = 0,222 (0,211 + 1,56 \times 10^{-5} \times 1510) \times 1510 = 79 \text{ "}$

Calor sacado por los gases = 6212 lb-cal/lb

Calor en los gases calientes = 6212 lb-cal ($1,8 \text{ BTU/lb-cal}$) = 11182 BTU

Calor sacado por los P.C calientes = 11182 BTU (51-4)

5.

Calor que entra a los recuperadores = 11182 BTU

Calor utilizado en precalentamiento del aire = 6081 BTU

Eficiencia = $6081/11182 = 0,544$

Eficiencia de los recuperadores = $54,4\%$ (51-5)

6.

Calor total suministrado al horno por libra de alquitrán = $21757/1,8 = 12087 \text{ lb-cal}$

Cálculo del contenido de calor en los P.C a cualquier temperatura.

$\text{CO}_2 = 3,219 (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,6599 t + 1,48 \times 10^{-4} t^2$

$\text{H}_2\text{O} = 0,951 (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,4403 t + 5,90 \times 10^{-5} t^2$

$\text{SO}_2 = 0,012 (0,139 + 3,1 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,0017 t + 3,72 \times 10^{-7} t^2$

$\text{N}_2 = 9,870 (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} t) \cdot t = 1,3787 t + 1,78 \times 10^{-4} t^2$

$\text{O}_2 = 0,222 (0,211 + 1,6 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,0468 t + 3,89 \times 10^{-4} t^2$

$\Sigma = 3,5274 t + 3,89 \times 10^{-4} t^2$

$3,89 \times 10^{-4} t^2 + 3,5274 t = 12087 \text{ lb-cal}$

$t = 2651^\circ\text{C}$

Temperatura de la llama en los quemadores = $2651^\circ\text{C} = 4813,8^\circ\text{F}$ (51-6)

EJERCICIO N°52 (7)

Un horno open-hearth es calentado con aceite crudo de Texas, el cual analiza lo siguiente:

C	84,6%	O ₂	2,9%
H ₂	10,9	S	1,6

La gravedad específica del aceite es 0,90.

Se utiliza un 20% de aire en exceso.

Los productos de combustión salen del horno y entran a los regeneradores a 1600°C. Dejan los regeneradores y entran a una caldera para pérdidas de calor a 700°C, dejan la caldera y pasan a la chimenea a 200°C.

Los regeneradores precalientan el aire a 1000°C. La caldera desarrolla 1 caballo-caldera por kilogramo de aceite quemado por hora.

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica del aceite en Kcal/Kg, calculada por la fórmula de Dulong.
2. La potencia calorífica del aceite, en BTU/galón.
3. El calor dejado por los productos de combustión, por kilogramo de aceite quemado en
 - a. En el horno.
 - b. En los regeneradores.
 - c. En la caldera.
 - d. Pérdidas en las chimeneas.
4. La eficiencia de los regeneradores y de la caldera.

SOLUCION

1.

Fórmula de Dulong:

$$P.C.B. = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S + 586(9H + W)$$

$$P.C.B. = 8100 \times 0.846 + 34000(0.109 - 0.029/8) + 2200 \times 0.016 + 586(9 \times 0.109 + 0)$$

$$= 9896$$

$$\text{Potencia calorífica del aceite} = 9896 \text{ Kcal/Kg. (52-1)}$$

2.

$$1 \text{ Kg. de aceite} = 1/0.9 = 1.11 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ galón} = 3.7854 \text{ litros.}$$

$$9896 \text{ (Kcal/kg)} \times (3.968 \text{ BTU/Kcal}) \times (1 \text{ Kg. } 1.11 \text{ m}^3) \times (1 \text{ m}^3/1000 \text{ lts}) \times (3.7854 \text{ lts./1 galón})$$

$$= 133,912 \text{ BTU/galón}$$

$$\text{Potencia calorífica del aceite} = 133,912 \text{ BTU/galón (52-2)}$$

3.

La trayectoria realizada por los gases es similar a la esquematizada en la Fig #1 del ejercicio #50, solo que en este caso, al salir los gases de los regeneradores entran a una caldera para pérdidas de calor, y de allí es cuando salen a las chimeneas.

Reacciones de combustión.

$$\begin{array}{ll} C + O_2 = CO_2: & O_2 = 0.846 \cdot (22.4/12) = 1.5792 \text{ m}^3 \\ H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O: & O_2 = 0.109 \cdot (22.4/4) = 0.6104 \text{ m}^3 \\ S + O_2 = SO_2: & O_2 = 0.016 \cdot (22.4/32) = 0.0112 \text{ m}^3 \\ \Sigma(O_2 \text{ reacciones}): & = 2.2008 \text{ m}^3 \end{array}$$

$$O_2 \text{ del combustible} = 0.029 \cdot (22.4/32) = 0.0203 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire teórico seco} = 2.2008 - 0.0203 = 2.1805 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 2.1805/0.21 = 10.38 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 10.38 \times 1.2 = 12.46 \text{ m}^3$$

Cálculo de los productos de combustión

$$N_2 = 12.46 \times 0.79 = 8.8434 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 1.5792 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 2 \times 0.6104 = 1.2208 \text{ m}^3$$

$$SO_2 = 0.0112 \text{ m}^3$$

$$O_2 = (12.46 - 10.38) \times 0.21 = 0.4308 \text{ m}^3$$

Contenido de calor de los gases a cualquier temperatura

$$N_2 + O_2 = 10.2802 \cdot (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 3.1046 t + 2.262 \times 10^{-4} t^2$$

$$CO_2 + SO_2 = 1.5904 \cdot (0.406 + 9.0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0.6457 t + 1.431 \times 10^{-4} t^2$$

$$H_2O = 1.2208 \cdot (0.373 + 5.0 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0.4553 t + 0.610 \times 10^{-4} t^2$$

$$\Sigma = 4.2956 t + 4.303 \times 10^{-4} t^2$$

Sea: Q = contenido de calor.

$$Q = 5,2956 t + 4,303 \times 10^{-4} t^2$$

Si

$$t = 1600^\circ\text{C}, Q = 7831 \text{ Kcal}$$

$$t = 700^\circ\text{C}, Q = 3555 \text{ Kcal.}$$

$$t = 200^\circ\text{C}, Q = 859 \text{ Kcal.}$$

En la caldera:

1 caballo-caldera = 8440 Kcal por hora.

$$\text{Calor desarrollado en la caldera} = \frac{1}{4} \times 8440 = 2110 \text{ Kcal.}$$

Precalentamiento del aire a 1000°C :

$$= 12,46 (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 4037 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor disponible} = 4037 + 9896 = 13933 \text{ Kcal.}$$

a

calor dejado en el horno:

$$Q_1 = 13933 - 7831 = 6102 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor dejado en el horno} = 6102 \text{ Kcal (52-3.a)}$$

b

calor dejado en los regeneradores:

$$Q_2 = 7831 - 3155 = 4676 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor dejado en los regeneradores} = 4676 \text{ Kcal (52-3 b)}$$

c

Calor dejado en la caldera:

$$Q_3 = 3155 - 859 = 2296 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor dejado en la caldera} = 2296 \text{ Kcal (52-3 c)}$$

d

Pérdidas en las chimeneas:

$$Q_4 = 859 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Pérdidas en las chimeneas} = 859 \text{ Kcal (52-3,d)}$$

4.

La eficiencia térmica es la relación entre el calor útil y el calor disponible o aportado al sistema, por tanto:

$$\text{Eficiencia en los regeneradores} = 4037/7831 = 0,516$$

$$\text{Eficiencia en regeneradores} = 51,6\% \text{ (52-4)}$$

$$\text{Eficiencia en la caldera} = 2110/3155 = 0,67$$

$$\text{Eficiencia en la caldera} = 67,0\% \text{ (52-4)}$$

EJERCICIO N°53 (7)

El coque utilizado como combustible en un horno de crisol, analizó lo siguiente:

C	85,8%
H ₂ O	9,8
R	4,4

Se suministró menos aire que el teóricamente requerido.

5% del carbono del coque se perdió en las cenizas, y el 16% del carbono que reaccionó pasó a formar CO en lugar de CO₂.

El aire utilizado estaba húmedo, conteniendo 22 gramos de vapor de agua en cada metro cúbico de aire húmedo. Esta humedad combúste con el carbono, de acuerdo a la reacción siguiente:



El H₂ permanece sin oxidarse.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire húmedo utilizado, por kilogramo de coque.
2. El volumen de los gases productos de la combustión, por kilogramo de coque.
3. La intensidad calórica:
 - a. Si el coque fuera quemado completamente con aire seco.
 - b. Si el coque fuera quemado bajo las condiciones establecidas arriba.

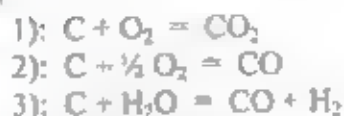
SOLUCION

1

Distribución del C:

$$\begin{aligned} \text{C en cenizas} &= 0,858 \times 0,05 = 0,0429 \text{ Kg.} \\ \text{C que reacciona} &= 0,858 - 0,0429 = 0,8151 \text{ Kg.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 0,8151 \times 0,16 = 0,1304 \text{ Kg.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 0,8151 - 0,1304 = 0,6847 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Reacciones.



Cálculo del aire húmedo y seco:

$$\text{H}_2\text{O en } 1 \text{ m}^3 \text{ de aire húmedo} = 22 \text{ g (1 Kg. 1000 g)} \cdot (22,4 \text{ m}^3 / 18 \text{ Kg.}) = 0,027 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco en } 1 \text{ m}^3 \text{ de aire húmedo} = 1 - 0,027 = 0,973 \text{ m}^3$$

$$\text{Composición del aire húmedo} = 2,7\% \text{H}_2\text{O y } 97,3\% \text{ de aire seco.}$$

$$\text{O}_2 \text{ en } 1 \text{ m}^3 \text{ de aire húmedo} = 0,973 \times 0,21 = 0,2043 \text{ m}^3$$

$$\text{C para H}_2\text{O en } 1 \text{ m}^3 \text{ de aire húmedo (reacción 3)} = 0,027 \cdot (12/22,4) = 0,014 \text{ Kg}$$

El C que pasa a CO no todo reacciona con el H₂O, por tanto tendremos que distribuirlo para calcular la proporción de O₂ que va a CO y a CO₂.

$$\text{O}_2 \text{ en CO} = 0,1304 \cdot (16/12) \cdot (22,4/32) = 0,1217 \text{ m}^3 = 8,69\%$$

$$\text{O}_2 \text{ en CO}_2 = 0,6847 \cdot (32/12) \cdot (22,4/32) = \frac{1,2781 \text{ m}^3}{1,3998 \text{ m}^3} = 91,31\%$$

$$\text{O}_2 \text{ en H}_2\text{O} = 0,027/2 = 0,0135 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ total en } 1 \text{ m}^3 \text{ de aire húmedo} = 0,2043 + 0,0135 = 0,2178 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 = 0,2178 \times 0,9131 = 0,1989 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} = 0,2178 \times 0,0869 = 0,0189 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ en CO (aire)} = 0,0189 - 0,0135 = 0,0054 \text{ m}^3$$

Distribución del C.

$$\text{C para CO}_2 = 0,1989 \cdot (12/22,4) = 0,1065 \text{ Kg.} = 84\%$$

$$\text{C para CO} = 0,0054 \cdot (12/11,2) = 0,0058 \text{ Kg.} = 4,6\%$$

$$\text{C para H}_2\text{O} = 0,0270 \cdot (12/22,4) = 0,0145 \text{ Kg.} = 11,4\%$$

$$\Sigma = 0,1268 \text{ Kg}$$

$$\text{Reacción (1): O}_2 = 0,8151 \times 0,840 \times (22,4/12) = 1,2781 \text{ m}^3$$

$$\text{Reacción (2): O}_2 = 0,8151 \times 0,046 \times (11,2/12) = 0,0350 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 1,3131 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco} = 1,3131/0,21 = 6,253 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 6,253/0,973 = 6,426 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 6,426 \text{ m}^3 \text{ (53-1)}$$

2

Productos de combustión = H₂ + CO + CO₂ + N₂ + H₂O:

$$\text{H}_2 = 0,8151 \times 0,114 \times (22,4/12) = 0,1734 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 1,2781 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} = 0,035 \times 2 + 0,8151 \times 0,114 \times (22,4/12) = 0,2435 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 6,253 \times 0,79 = 4,9499 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,044 \times (22,4/18) + 6,426 - 6,253 - 0,1734 = 0,0544 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C.} = 0,1734 + 1,2781 + 0,2435 + 4,9499 + 0,0544 = 6,6993 \text{ m}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 6,7 \text{ m}^3 \text{ (53-2)}$$

a

Sabemos que

Potencia calorífica + calor por precalentamiento del combustible (0) + calor por precalentamiento del aire (0) = Volumen P.C x calor específico x temperatura .

Temperatura = calorías disponibles (volumen P.C x calor específico)

$$P.C.B = 8100 \times 0,8151 - 586 \times 0,044 = 6577 \text{ Kcal/Kg.}$$

En este caso las reacciones de combustión es la (1), por tanto

$$O_2 \text{ del C} = 0,8151 \cdot (22,4/12) = 1,5215 \text{ m}^3 = CO_2$$

$$H_2O = 0,044 \cdot (22,4/18) = 0,0548 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1,5215/0,21 = 7,2453 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 7,2453 \times 0,79 = 5,7238 \text{ m}^3$$

Contenido de calor en los productos de combustión a cualquier temperatura

$$N_2 = 5,7238 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$CO_2 = 1,5215 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$H_2O = 0,0548 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$\Sigma = 2,367 t + 2,656 \times 10^{-4} t^2$$

$$6577 = 2,367 t + 2,656 \times 10^{-4} t^2$$

$$t = 2223,7^\circ C$$

$$\text{Intensidad calórica} = 2224^\circ C \text{ (53-3.a)}$$

b.

Potencia calorífica de C:

$$C \rightarrow CO = 2430 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 8100 \text{ "}$$

$$\text{Potencia calorífica} = 0,6847 \times 8100 + 0,1304 \times 2430 - 586 \times 0,044 = 5838 \text{ Kcal/Kg.}$$

Contenido de calor en productos de combustión:

$$CO + N_2 + H_2 = 5,3668 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$CO_2 = 1,2781 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$H_2O = 0,0544 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$\Sigma = 2,160 t + 2,358 \times 10^{-4} t^2$$

$$5838 = 2,160 t + 2,358 t^2$$

$$t = 2183^\circ C$$

$$\text{Intensidad calórica} = 2183^\circ C \text{ (53-3.b)}$$

En el caso anterior no se tomó en cuenta la descomposición del agua para formar CO y H₂ pero incorporando este fenómeno, tendríamos:

La reacción de descomposición del agua es la (3).

Los calores de formación del H₂O(g) y del CO, son respectivamente - 57801 y - 29160 Kcal/mol. (ver Tabla XLII del Apéndice):

$$H_2O = 0,8151 \times 0,114 \cdot (18/12) = 0,1394 \text{ Kg.} - 0,0077 \text{ moles.}$$

$$CO = 0,8151 \times 0,114 \cdot (28/12) = 0,2168 \text{ Kg.} - 0,0077 \text{ moles}$$

$$\text{Calor de reacción} = 0,0077 \times (-29160 + 57801) = +222 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica} = 0,6848 \times 8100 + 0,8151 \times 0,046 \times 2430 - 586 \times 0,044 = 5612 \text{ Kg.}$$

A esta hay que restarle en calor de reacción que por tener signo (+), fue calor consumido

$$\text{Calor disponible} = 5612 - 222 = 5390 \text{ Kcal.}$$

$$5390 = 2,160 t + 2,358 t^2$$

$$t = 2041^\circ C$$

$$\text{Intensidad calórica} = 2041^\circ C \text{ (53-3.b)}$$

EJERCICIO N°54 (9)

Los datos siguientes se obtuvieron de un carbón bituminoso.
Análisis final, base en seco:

C	77,6%	O	4,5%
H	5,3	N	1,5
S	2,8	Cenizas	8,3

En húmedo, el carbón tenía una humedad del 4%.

Potencia calorífica bruta (P.C.A.), en seco, BTU/lb = 13800

PREGUNTAS

1. La potencia calorífica en húmedo.
2. La potencia calorífica neta (P.C.B), en seco.
3. La potencia calorífica neta, en húmedo.
4. La potencia calorífica bruta, en seco, utilizando la fórmula de Dulong (compararla con el valor medido).

SOLUCION

1.

En base húmeda, la composición del carbon presentada inicialmente representaría el 96% del peso, por tanto, la composición en húmedo sería.

C	= 0,776x96 = 74,50%
H	= 0,053x96 = 5,09
N	= 0,015x96 = 1,44
O	= 0,045x96 = 4,31
S	= 0,028x96 = 2,69
Cenizas	= 0,083x96 = 7,97
H ₂ O	= 4,00
	100,00

Fórmula de Dulong:

$$P.C.A = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S$$

$$P.C.A = 14600 \times 0,745 + 61000 (0,0509 - 0,0431,8) + 4000 \times 0,0269 = 13761$$

$$P.C.A(\text{en húmedo}) = 13761 \text{ BTU/lb (54-1)}$$

2.

$$P.C.B = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S - 1050(9H + W)$$

$$P.C.B = 14600 \times 0,776 + 61000 (0,053 - 0,045,8) + 4000 \times 0,028 - 1050(9 \times 0,053 + 0) = 13830$$

$$P.C.B (\text{en seco}) = 13830 \text{ BTU/lb (54-2)}$$

3.

$$P.C.B (\text{en húmedo}) = P.C.A - 1050(9H + W)$$

$$P.C.B (\text{en húmedo}) = 13761 - 1050(9 \times 0,0509 + 0,04) = 13238$$

$$P.C.B (\text{en húmedo}) 13238 \text{ BTU/lb (54-3)}$$

4.

$$P.C.A (\text{en seco}) = 14600 \times 0,776 + 61000 (0,053 - 0,045,8) + 4000 \times 0,028 = 14331$$

$$P.C.A (\text{en seco}) = 14331 \text{ BTU/lb (54-4)}$$

Este valor resultó mayor que el medido.

EJERCICIO N°55 (8)

360 kilogramos de vapor de agua pasan a través de 4000 kilogramos de coque a una temperatura inicial de 1400°C formandose 448 kilogramos de CO, 88 de CO₂ y 40 de H₂, a una temperatura media de 1000°C.

El vapor entra a 120°C, saturado.

La pérdida por radiación es de 100000 kilocalorías.

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura final del lecho de coque.

SOLUCION

1.

Para la solución de este ejercicio vamos a necesitar los datos que se dan a continuación y que se encuentran en la Tabla 19 (8):

Capacidad calorífica media (C_p) = Kcal/mol

$C_p(H_2O)$

8,084 (25°C - 100°C)

8,177 (200°C)

por interpolación se encuentra para 120°C = 8,1026

$C_p(CO) = 7,587$ (1000°C)

$C_p(CO_2) = 11,92$ (1000°C)

$C_p(H_2) = 7,128$ (1000°C)

$C_p(\text{coque}) = 0,403$ (25 - 1300°C)

Calor de vaporización del agua = 9717 Kcal/mol

Calores de formación (Kcal/mol) x 1000 para:

$H_2O(l) = -68,3174$

$H_2O(g) = -57,7979$

$C(\text{amorfo}) = +2,6$

$CO = -26,4157$

$CO_2 = -94,0518$

Cálculo de los moles de los compuestos:

$H_2O = 360/18 = 20$ Kg-mol

Coque = $4000/12 = 333,33$ Kg-mol

$CO = 448/28 = 16$

$CO_2 = 88/44 = 2$

$H_2 = 40/2 = 20$

Reacción



Lecho de coque al final = $333,33 - 18 = 315,33$ Kg-mol

Ya sabemos que:

Contenido de calor = Cantidad x Capacidad calorífica x temperatura.

Calor de entrada:

Coque = $4000 \times 0,403 \times (1400 - 25) = 2'216.500$ Kcal.

$H_2O = 20 \times 8,084 \times (100 - 25) + 29 \times 8,1026 \times (120 - 100) = 209.707$ Kcal

Calor de entrada = $2'216.500 + 209.707 = 2'426.207$ Kcal.

Se sabe que:

Calor de reacción = $\sum \text{calor de formación de productos} - \sum \text{calor de formación reactivos}$

Calor de reacción = $[2 \times (-94052) + 16 \times (-26416)] - [18 \times (+2600) + 20 \times (-57798)]$
= + 498.400 Kcal

Contenido de calor en los gases a 1000°C:

$CO = 16 \times 7,587 \times (1000 - 25) = 118357$ Kcal

$CO_2 = 2 \times 11,92 \times (1000 - 25) = 23244$ kcal

$H_2 = 20 \times 7,128 \times (1000 - 25) = 138996$ Kcal

$\Sigma = 280597$ Kcal.

Calor final en el lecho de coque (Q) = Calor de entrada - calor consumido en la reacción - calor que se llevan los gases - pérdidas por radiación

$Q = 2'426.207 - 498.400 - 280.597 - 100.000 = 1'547.210$ Kcal.

Suponiendo que el coque es C puro:

Lecho de coque = $315,33 \text{ Kg-mol} \cdot (12 \text{ Kg} / 1 \text{ Kg-mol}) = 3783,96$ Kg.

$1'547.210 = 3783,96 \times 0,403 \times (t - 25)$

$t = 1039,6^\circ\text{C}$

Temperatura final del lecho de coque = 1040°C (15-1)

EJERCICIO N°56 (8)

PREGUNTAS

1 Calcular la temperatura máxima teórica de la flama, en °C, cuando se quema en siguiente gas con la cantidad teorica de aire seco, partiendo de aire y gas a 25°C

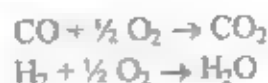
CO	30%
H ₂	15
O ₂	1
CO ₂	5
N ₂	49

SOLUCION

1

En los ejercicios anteriores, para el cálculo de calor se ha utilizado el calor específico cuyas unidades son Kcal o BTU por Kg. y o por libra y por temperatura en °C. En este caso, utilizaremos la capacidad calorífica cuyas unidades son, unidades de calor (Kcal o BTU), por mol y por temperatura pero absoluta (K, o R). Por eso, nuestro balance lo haremos sobre la base del mol

Reacciones de combustión.



Supongamos 1 mol de CO:

Balance del gas inicial

CO	1,000 mol-g
H ₂ = 1·(15/30) =	0,500 mol-g
O ₂ = 1·(1/30) =	0,033 mol-g
CO ₂ = 1·(5/30) =	0,167 mol-g
N ₂ = 1·(49/30) =	1,630 mol-g

Cálculo del aire:

$$\begin{aligned}\text{O}_2 \text{ del CO} &= 0,5 \text{ mol-g} \\ \text{O}_2 \text{ del H}_2 &= 0,5 \cdot (1/2) = 0,25 \text{ mol-g} \\ \text{O}_2 \text{ del aire teórico} &= 0,5 + 0,25 - 0,033 = 0,717 \text{ mol-g} \\ \text{Aire teórico} &= 0,717/0,21 = 3,414 \text{ mol-g.}\end{aligned}$$

Productos de combustión = CO₂ + H₂O + N₂

$$\begin{aligned}\text{CO}_2 &= 0,167 + 1 = 1,167 \text{ mol-g} \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,5 \text{ mol-g} \\ \text{N}_2 &= 1,63 + 3,414 \cdot 0,79 = 4,327 \text{ mol-g.}\end{aligned}$$

La entalpia o calor de n moles de cualquier material producto a una temperatura T (K), referida a una temperatura de 25°C (298K), se expresa por

$$\sum H_p = \sum n_i \int_{298}^T C_{pi} dT \quad (7)$$

Aquí, C_{pi} = capacidad calorífica del componente "i".

Esta capacidad calorífica normalmente se expresa como una función cuadrática de la temperatura,

$$C_{pi} = a_i + b_i T + c_i T^2 \quad (8)$$

Introduciendo (8) en (7), e integrando:

$$\sum H_f = \sum n \left[a(T - 298) + \frac{b}{2}(T^2 - 298^2) + \frac{c}{3}(T^3 - 298^3) \right] \quad (9)$$

Entalpia de productos de combustión, $\sum H_p$ (referidas a 25°C = 298K)

$$\begin{aligned} \text{CO}_2: a &= 6,339; b = 0,01014; c = -3,415 \times 10^{-6} \\ H &= 1,67[6,339(T - 298) + (0,01014/2)(T^2 - 298^2) - (3,415 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)] \\ \text{N}_2: a &= 6,457; b = 0,001388; c = -0,069 \times 10^{-6} \\ H &= 4,327[6,457(T - 298) + (0,001388/2)(T^2 - 298^2) - (0,069 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)] \\ \text{H}_2\text{O}: a &= 7,136; b = 0,00264; c = +0,0459 \times 10^{-6} \\ H &= 0,5[7,136(T - 298) + (0,00264/2)(T^2 - 298^2) + (0,0459 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)] \end{aligned}$$

Sumando todo tendremos:

$$\sum H_p = 38,905T + 0,00958T^2 - 1,42 \times 10^{-6}T^3 - 12407$$

Los calores de combustión, potencias caloríficas, se encuentran tabulados (8)

$$H_2 = 68317,4 \text{ cal/mol-g}$$

$$\text{CO} = 67636,1 \text{ cal/mol-g}$$

$$\text{Calor de combustión total} = 67636 + 68317 \times 0,5 = 101794,5 \text{ cal}$$

Este es el calor disponible ..

$$38,905T + 0,0095T^2 - 1,42 \times 10^{-6}T^3 - 12407 = 101795,5$$

Por prueba y error se determinó T:

$$T = 2160\text{K} = 1887^\circ\text{C}$$

Temperatura teórica de la llama = 1887°C. (56-1)

EJERCICIO N°57 (8)

PREGUNTAS

1. Calcúlese la temperatura teórica de la llama cuando el gas anterior se quema con un 100% de aire exceso.

SOLUCION

1.

En este caso, la composición y la cantidad de los productos de combustión cambia, pues habrá que adicionarle el oxígeno y el nitrógeno del aire en exceso.

$$\text{Aire exceso} = 3,414 \text{ mol-g}$$

$$\text{N}_2, \text{exceso} = 3,414 \times 0,79 = 2,697 \text{ mol-g}$$

$$\text{O}_2, \text{exceso} = 3,414 - 2,697 = 0,717 \text{ mol-g}$$

Entalpia de estos productos de combustión:

$$\text{N}_2: H = 2,697[6,457(T - 298) + (0,001388/2)(T^2 - 298^2) - (0,069 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)]$$

$$\text{O}_2: H = 0,717[6,177(T - 298) + (0,003167/2)(T^2 - 298^2) - (1,005 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)]$$

La sumatoria de estos.

$$H(\text{N}_2 + \text{O}_2) = 21,80T + 3,01 \times 10^{-3}T^2 - 3,02 \times 10^{-7}T^3 - 6756$$

Si le adicionamos este valor al de los PC ya encontrados en el ejercicio anterior, tomando en cuenta que la potencia calorífica del gas sigue siendo la misma, nos resulta

$$60,705T + 12,59 \times 10^{-3}T^2 - 1,722T^3 = 120957,5$$

Por prueba y error se determino T:

$$T = 1580K = 1307^{\circ}C.$$

Se puede observar que el valor de T disminuyó, debido a que el aire exceso también absorbe calor.

$$\text{Temperatura teórica de la llama} = 1307^{\circ}C \text{ (57-1)}$$

EJERCICIO N°58 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura de la llama para el gas del ejercicio 56 cuando se quema con la cantidad de aire teórica y ambos, gas y aire se calientan a $500^{\circ}C$ previamente a la combustión

SOLUCION

1
Capacidad calorífica media entre 25 y $t^{\circ}C$ (cal mol-g K), ver tablas pag. 269 (8).

$$T = 500^{\circ}C$$

$$O = 7,210$$

$$H_2 = 6,995$$

$$O_2 = 7,515$$

$$CO_2 = 10,776$$

$$N = 7,159$$

$$\text{Aire} = 7,225$$

$$\text{Aire teórico} = 3,414 \text{ mol-g}$$

$$O_2 \text{ total} = 0,033 + 0,717 = 0,75 \text{ mol-g}$$

$$N_2 \text{ total} = 1,63 + (3,414 - 0,717) = 4,327 \text{ mol-g}$$

Precalentamientos del gas + aire:

$CO = 1 \times 7,210 (500 - 25) =$	3424,75 cal
$H_2 = 0,5 \times 6,995 (500 - 25) =$	1661,31
$O_2 = 0,75 \times 7,515 (500 - 25) =$	1677,22
$CO_2 = 0,167 \times 10,776 (500 - 25) =$	854,81
$N_2 = 4,327 \times 7,159 (500 - 25) =$	14714,07 cal
Total precalentamiento	23332,16 cal

Este calor se le adiciona a la potencia calorífica para formar en calor total disponible, así:

$$38,905T + 9,58 \times 10^{-3}T^2 - 1,42 \times 10^{-6}T^3 - 12407 = 101794,5 + 23332,2$$

$$38,905T + 9,58 \times 10^{-3}T^2 - 1,42 \times 10^{-6}T^3 = 137534$$

Por prueba y error, T resultó:

$$T = 2550K = 2277^{\circ}C$$

Se puede observar que al precalentar el aire y el gas, la temperatura de la llama aumento

$$\text{Temperatura de la llama} = 2277^{\circ}C \text{ (58-1)}$$

EJERCICIO N°59 (8)

PREGUNTAS

1. Calcular la temperatura teórica de la llama para el gas del ejercicio 56, si es quemado con la cantidad teórica de aire, pero la combustión del CO y el H₂ se realiza solo en un 80%. El gas y el aire se encuentran inicialmente a 25°C.

SOLUCION

1.

$$\text{Potencia calorífica} = 101794,5 \times 0,8 = 81435,6 \text{ cal}$$

El 20% del CO y del H₂ va a los P.C:

Cálculo de los productos de combustión.

$$\text{CO} = 1 \times 0,2 = 0,2 \text{ mol-g}$$

$$\text{H}_2 = 0,5 \times 0,2 = 0,1 \text{ mol-g}$$

$$\text{CO}_2 = 0,167 \div 0,8 = 0,967 \text{ mol-g}$$

$$\text{O}_2 \text{ del CO} = 0,8 \cdot (1/2) = 0,4 \text{ mol-g}$$

$$\text{O}_2 \text{ del H}_2 = 0,5 \times 0,8 \times 0,5 = 0,2 \text{ mol-g}$$

$$\text{O}_2 \text{ reacción} = 0,6 \text{ mol-g}$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire teórico} = 0,6 - 0,033 = 0,567 \text{ mol-g}$$

$$\text{Aire teórico} = 0,567 / 0,21 = 2,7 \text{ mol-g}$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 1,63 + 2,7 - 0,567 = 3,763 \text{ mol-g}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,5 \times 0,8 = 0,4 \text{ mol-g}$$

Contenido de calor en los P.C:

$$\text{CO} = 0,2[6,350(T - 298) + (1,811 \times 10^{-3})T^2 - 298^2] + (0,2675 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)$$

$$\text{H}_2 = 0,1[6,946(T - 298) + (0,196 \times 10^{-3})T^2 - 298^2] + (0,4757 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)$$

$$\text{CO}_2 = 0,967[6,339(T - 298) + (10,14 \times 10^{-3}/2)(T^2 - 298^2) - (3,415 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)]$$

$$\text{N}_2 = 3,763[6,457(T - 298) + (1,389 \times 10^{-3})T^2 - 298^2] + (0,069 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,4[7,136(T - 298) + (2,64 \times 10^{-3})T^2 - 298^2] + (0,0459 \times 10^{-6}/3)(T^3 - 298^3)$$

$$\Sigma = 35,247T + 8,215 \times 10^{-3}T^2 - 1,183 \times 10^{-6}T^3 - 11202$$

Calor disponible = contenido de calor en los P.C

$$81435,6 = \Sigma$$

Resolviendo por prueba y error, se encontró $T = 1973\text{K} = 1700^\circ\text{C}$

Temperatura teórica de la llama = 1700°C (59-1)

EJERCICIO N°60 (8)

Un gas combustible tiene la siguiente composición en volumen:

CO ₂	2,1%
O ₂	0,5
C ₂ H ₄ (olefinas)	7,0
CO	38,8
H ₂	40,6
C ₁₂ H ₄ (parafinas)	11,2
N ₂	4,8

PREGUNTAS

1. Calcúlese el análisis de los humos formados por combustión de este gas con un 30% de aire en exceso, supuesto que todos los componentes combustibles se quemen a CO₂ y H₂O.
2. Calcular la potencia calorífica en BTU/ft³ normal.

SOLUCION

1.

Vamos a calcular el oxígeno consumido y los productos de combustión (humos) resultantes de quemar 1 m³ de gas, como lo muestra el cuadro siguiente.

Reacciones	O ₂ + humos (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
$C_{12}H_{22} + 3.55 O_2 \rightarrow 2.5 CO_2 + 2.1 H_2O$	0.2485	0.1750	0.1470	---
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	0.1940	0.3880	---	---
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	0.2030	---	0.4060	---
$C_{12}H_{22} + 2.3 O_2 \rightarrow 1.2 CO_2 + 2.2 H_2O$	0.2576	0.1344	0.2464	---
N ₂	---	---	---	0.048
CO ₂	---	0.0710	---	---
Totales	0.9031	0.7184	0.7994	0.048

$$O_2 \text{ para el aire teórico} = 0.9031 - 0.005 = 0.8981 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 0.8981 / 0.21 = 4.2767 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 4.2767 \times 1.3 = 5.56 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 5.56 - 4.2767 = 1.283 \text{ m}^3$$

Análisis de los humos (60-1)

$$O_2 = 1.283 \times 0.21 = 0.2694 \text{ m}^3 = 4.33\%$$

$$N_2 = 5.56 \times 0.69 + 0.048 = 4.4404 \text{ m}^3 = 71.30\%$$

$$CO_2 = 0.7184 \text{ m}^3 = 11.54\%$$

$$H_2O = 0.7994 \text{ m}^3 = 12.81\%$$

$$6.2276 \text{ m}^3 = 100.00\%$$

2.

Los datos para el cálculo de la potencia calorífica de este tipo de combustibles gaseosos aparecen en la Tabla 37, página 427 de (8).

Para el caso de las potencias caloríficas de los hidrocarburos saturados y no saturados, la potencia calorífica se calcula por medio de las formulas aproximadas siguientes

Hidrocarburos parafinicos (saturados), C_nH_{2n+2} (n = # átomos de C):

$$\text{Cal por mol - g} = 158100n + 54700$$

$$\text{BTU/ft}^3 = 745n + 258 \quad (10)$$

Para hidrocarburos no saturados, C_aH_b

$$\text{Cal por mol - g} = 98200a + 28200b + 28800$$

$$\text{BTU/ft}^3 = 459a + 132b + 135 \quad (11)$$

Potencia calorífica de

$$\begin{aligned} C_{25}H_{42} &= 0,07 \cdot (459 \times 2,5 + 132 \times 4,2 + 135) = 128,6 \text{ BTU} \\ CO &= 0,388 \times 316 = 122,6 \text{ BTU} \\ H_2 &= 0,406 \times 319 = 129,5 \text{ BTU} \\ C_{12}H_{44} &= 0,112 \cdot (745 \times 1,2 + 258) = 129,0 \text{ BTU} \\ &= 509,7 \text{ BTU} \end{aligned}$$

$$\text{Potencia calorífica} = 510 \text{ BTU (60-2)}$$

EJERCICIO N°61 (8)

Un gas pobre tiene la siguiente composición en volumen:

CO	23,0%
CO ₂	4,4
O ₂	2,4
N ₂	70,0

PREGUNTAS

1. Calcular los pies cúbicos de gas, a 70°F y 750 mm Hg de presión, por libra de carbono presente
2. Calcúlese el volumen de aire, en las condiciones de la pregunta 1, necesario para la combustión de 100 pies cúbicos de gas a las mismas condiciones, si se desea que el oxígeno total presente antes de la combustión sea de 20% en exceso del necesario teóricamente
3. Calcúlese la composición, en porcentaje en volumen, de los gases que salen del quemador de la pregunta 2, supuesta completa la combustión
4. Calcúlese el volumen de los gases que salen de la combustión en las preguntas 2 y 3, a la temperatura de 600°F y presión de 750 mm Hg; por cada 100 pies cúbicos de gas quemado.

SOLUCION

1.

Haremos el cálculo a C.N y luego pasaremos a las condiciones reales.
Usando la ecuación (6).

$$C \text{ total en gases} = 1 \text{ lb.}$$

Asumimos 1 ft³ de gas

$$C/\text{ft}^3 \text{ de gas} = C \text{ en CO} + C \text{ en CO}_2$$

$$C/\text{ft}^3 \text{ de gas} = 0,23 (12/359) + 0,044 (12/359) = 0,00916 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{ft}^3 \text{ de gas a C.N} = 1/0,00916 = 109,185$$

Pasamos a C.D:

$$V_1 = 109,185 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 750 \text{ mm}$$

$$T_1 = 492^\circ\text{R}$$

$$T_2 = 460 + 70 = 530^\circ\text{R}$$

$$V_2 = 109,185 (760/750) \cdot (530/492) = 119,18 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas a C.D} = 119,2 \text{ ft}^3 (61-3)$$

2.

Reacción de combustión:



$$O_2 \text{ del CO} = 100 \times 0,23 \times 0,5 = 11,5 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ para el aire teórico} = 11,5 - 100 \times 0,024 = 9,1 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ total} = 9,1 \times 1,2 = 10,92 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 10,92/0,21 = 52 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 52 \text{ ft}^3 (61-2)$$

3.
 $P.C = CO_2 + O_2 + N_2$

Composición del gas (61-3)

$$\begin{aligned} CO_2 &= 100 \times 0,044 + 23 = 27,40 \text{ ft}^3 = 19,53\% \\ O_2 &= 10,91 - 9,1 = 1,82 \text{ ft}^3 = 1,30\% \\ N_2 &= 100 \times 0,7 + 52 \times 0,79 = \frac{111,08 \text{ ft}^3}{140,30 \text{ ft}^3} = \frac{79,17\%}{100,00\%} \end{aligned}$$

4.

$$\begin{array}{ll} V_1 = 140,3 \text{ ft}^3 & V_2 = ? \\ P_1 = 750 \text{ mm} & P_2 = 750 \text{ mm} \\ T_1 = 530^\circ R & T_2 = 460 + 600 = 1060^\circ R \end{array}$$

$$V_2 = 140,3 \cdot (1060/530) = 280,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen de P.C a C.D} = 280,6 \text{ ft}^3 \text{ (61-4)}$$

EJERCICIO N°62 (8)

Un gas tiene la siguiente composición en volumen.

No saturados (C_2H_4 y C_6H_6)	53,6%
O_2	1,6
CH_4	16,9
C_2H_6	24,3
N_2	3,6

La potencia calorífica de este gas es 1898 BTU/ft³ normal.

PREGUNTAS

1. Calcular los porcentajes de C_2H_4 y C_6H_6 en el gas.

SOLUCION

1.

En (8), pag 427, Tabla 37 se dan las potencias caloríficas de los gases (BTU ft³), en los términos que aparecen a continuación:

CH_4	994	C_2H_6	1742
C_2H_4	1756	C_6H_6	3687

$$P.C.B = P.C(CH_4) + P.C(C_2H_6) + P.C(C_2H_4) + P.C(C_6H_6)$$

Potencias caloríficas de:

$$CH_4 = 994 \times 0,169 = 168,0 \text{ BTU}$$

$$C_2H_6 = 1742 \times 0,243 = 423,3 \text{ BTU}$$

$$591,3 \text{ BTU}$$

Sea

A = fracción de C_2H_4

B = fracción de C_6H_6

Establezcamos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$(1) \quad A \times 1756 + B \times 3687 = 1898 - 591,3 = 1306,7$$

$$(2) \quad A + B = 0,536$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior:

$$A = 0,3172; B = 0,2188, \text{ por tanto}$$

$$C_2H_4 = 31,72\% \text{ y } C_4H_4 = 21,88\% (62-1)$$

EJERCICIO N°63 (8)

Abajo se presentan los análisis para un carbón tipo antracita.

Ambos análisis, el inmediato y el próximo, están realizados sobre la base "como se reciben", y el hidrógeno dado en el análisis inmediato incluye el hidrógeno de la humedad libre en el carbón.

ANÁLISIS PRÓXIMO		ANÁLISIS MEDIATO	
Humedad	4,3%	Carbono	82,5%
Materia volátil	3,0%	Hidrógeno	2,0%
C (fijo)	82,6%	Nitrógeno	0,6%
Cenizas (no corregidas)	10,1%	Azufre	0,5%

Potencia calorífica = 12650 BTU/lb.

PREGUNTAS

1. Recalcular el análisis inmediato, aportando:

- Carbono
- Hidrógeno neto
- H₂O libre
- H₂O combinada
- Azufre
- Nitrógeno
- Cenizas corregidas

2. Calcular la potencia calorífica total por la fórmula de Dulong. Comparar el resultado con el valor experimental.

3. Calcular la potencia calorífica total por el método de Uehling. Comparar el resultado con el valor experimental.

4. Suponiendo que solo se dispone del análisis próximo y de la potencia calorífica total, calcular el porcentaje de carbono y el porcentaje de hidrógeno neto por el método de Uehling.

5. Calcular la potencia calorífica neta.

SOLUCION

1.

En un *análisis inmediato* se hace la determinación de C u de los principales elementos químicos.

En un *análisis próximo o inmediato* se determinan cuatro grupos de constituyentes de índole arbitrariamente: *humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas*.

Para el cálculo de este punto, haremos uso de la siguiente expresión:

$$\% \text{ de cenizas corregidas} = \% \text{ cenizas pesadas} - \frac{3}{8}(\% S) \quad (12)$$

$$\% \text{ cenizas corregidas} = 10,1 - (3/8) \times 0,5 = 9,9125\%$$

El exceso de hidrógeno necesario para combinarse con el oxígeno, se denomina hidrógeno "neto" o "aprovechable".

El porcentaje de oxígeno que contiene el carbón, se toma como la diferencia entre 100 y la suma de los porcentajes de C, H, S, N y las cenizas corregidas exentas de S.

$$O_2 \text{ del agua combinada} = 100 - 85,6 - 4,3 - 9,91 = 0,19\%$$

$$H_2O \text{ combinada} = 0,19 \times (18/16) = 0,21\%$$

$$H_2 \text{ de esta} = 0,21 - 0,19 = 0,02\%$$

$$H_{\text{neto}} = 2 - 0,02 = 1,98\%$$

Análisis Mediano Recalculado (63-1)

C	82,50%
H neto	1,98
H ₂ O libre	4,30
H ₂ O combinada	0,21
S	0,50
N	0,60
Cenizas corregidas	9,91
	100,00

2.

Vamos a replantear el cálculo de la potencia calorífica sobre la base de las siguientes fórmulas.

$$\text{Potencia calorífica total} = 14490C + 61000H_{\text{neto}} + 5550S \quad (13)$$

$$\text{Potencia calorífica neta} = \text{P.C total} - 8,94 \times H \times 1050 \quad (14)$$

$$\text{P.C total} = 14490 \times 0,825 + 61000 \times 0,0198 + 5550 \times 0,005 = 13190 \text{ BTU/lb}$$

$$\text{Potencia calorífica total} = 13190 \text{ BTU/lb (63-2)}$$

Con relación al dato experimental existe una diferencia de $13190 - 12650 = 540 \text{ BTU/lb}$, lo que significa un error de $540/12650 = 4,27\%$. Esto puede deberse a que los elementos combustible que se asumen libres, pueden estar combinados formando cenizas de diversa naturaleza, o gases que no se descompusieron para reaccionar.

3

Uehling utilizó diversos criterios para establecer la siguiente tabla (8)

POTENCIAS CALORIFICAS NORMALES Y CONTENIDOS EN HIDROGENO NETO DE CARBON:

CALIDAD	P.C (BTU/lb)	H _n (hidrógeno neto)
Coque	14490	0,0
Antracita	16100	0,029
Semi-bituminoso	17400	0,049
Bituminoso	17900	0,054
Sub-bituminoso	17600	0,045
Lignito	17100	0,037

Para el carbón antracítico:

$$\text{P.C total} = 16100 \text{ BTU/lb de C total}$$

$$\text{P.C total} = 16100 \times 0,825 = 13282,5 \text{ BTU/lb}$$

$$\text{P.C total} = 13282,5 \text{ BTU/lb (63-3)}$$

En este caso, la diferencia es de $13282 - 12650 = 632 \text{ BTU/lb}$, representando un error de $632/12650 = 5\%$ que como se puede ver, es mayor que en la fórmula de Dulong, lo cual se puede deber a que esta última se fundamenta en el análisis elemental y la de Uehling solo toma en cuenta el hidrógeno y el C independientemente de cualquier cantidad que al no reaccionar, se vaya a las cenizas.

4

Como solo disponemos de la potencia calorífica total y del análisis próximo, de acuerdo a Uehling podemos proceder así:

$$12650 = 16100C$$

$$C = 12650/16100 = 0,7857$$

$$C = 78,57\% \text{ (63-4)}$$

Para esta calidad de carbón:

$$H_{\text{neto}} = 0,029 \text{ lb/lb de C total}$$

$$H_{\text{neto}} = 0,7857 \times 0,029 \times 100 = 2,28$$

$$H_{\text{neto}} = 2,28\% \quad (63-4)$$

5.

Haciendo uso de la fórmula (14):

H = fracción en peso del H (total), incluyendo H (neto), H (humedad) y H (H₂O combinada).

$$H_{\text{(total)}} = 1,98 + 4,3 \times (2/18) + 0,02 = 2,48\%$$

$$P.C_{\text{neto}} = 13190 - 8,94 \times 0,0248 \times 1050 = 12957$$

$$P.C_{\text{neto}} = 12957 \text{ BTU/lb.} \quad (63-5)$$

EJERCICIO N°64 (8)

Un carbón americano presentó el siguiente análisis:

ANÁLISIS PROXIMO AL RECIBIRLO		ANÁLISIS MEDIANO DE COMBUSTIBLE (sobre la base de exento de cenizas corregidas y de humedad)	
Humedad	2,97%	C	84,39%
Cenizas (no corregidas)	2,94	Hidrógeno neto	4,81
Materia volátil	37,75	N	2,00
Carbono (fijo)	56,34	S	1,02
		H ₂ O (combinada)	7,78

El combustible anterior incluye aquellas porciones del carbón que no están clasificadas como humedad o cenizas corregidas.

PREGUNTAS

Determinar sobre la base "del recibido":

1. Calidad del carbón
2. Potencia calorífica total por la fórmula de Dulong.
3. Potencia calorífica total por el método de Uehling.
4. Contenido de hidrógeno neto, calculado por el método de Uehling.
5. Potencia calorífica neta por el método de Uehling.
6. Análisis mediano (como se recibe, cenizas corregidas).

SOLUCION

1.

La *proporción combustible* de un carbón se define (8) como la relación entre el porcentaje de carbono fijo y el de materia volátil. En base a esta definición se ha elaborado la siguiente

CALIDAD DE CARBONES

CALIDAD	PROPORCIÓN COMBUSTIBLE
Antracita	Entre 10 y 60
Semiantracita	Entre 6 y 10
Sem bituminoso	Entre 3 y 7
Bituminoso	Entre 1/2 y 3

$$\text{Proporción Combustible} = \frac{\%C(\text{fijo})}{\% \text{Materia Volátil}} \quad (15)$$

Para este carbón = $56,34/37,75 = 1,49$.

Esta proporción combustible ubica a este carbón en el rango bituminoso.

Calidad del carbón = Bituminoso (64-1)

2.

La ecuación 13, de Dulong se expresa:

$$P.C. \text{ Total} = 14490C + 61000H_{\text{neto}} + 5550S.$$

Como puede verse, esta fórmula tiene aplicación para el análisis mediano (elemental) pero no para el próximo (inmediato), por tanto, debemos ajustar el análisis elemental mediante la inclusión de la humedad y las cenizas corregidas.

Si asumimos 100 libras de carbón (recibido):

Humedad = 2,97 lbs.

La ecuación 12:

$$\% \text{ cenizas corregidas} = \% \text{ cenizas total} - (3/8) \cdot \% S$$

$$\% \text{ cenizas corregidas} = 2,84 - 1,02 \cdot (3/8) = 2,56\%$$

$$\text{Análisis mediano sin cenizas ni humedad} = 100 - 2,97 - 2,56 = 94,97\%$$

El análisis mediano quedaria:

C	$84,39 \times 0,9447$	79,72%
H _{neto}	$4,81 \times 0,9447 =$	4,54%
N	$2 \times 0,9447 =$	1,89%
S	$1,02 \times 0,9447$	0,96%
H ₂ O (combinada)	$7,78 \times 0,9447 =$	7,35%
Humedad =		2,97%
Cenizas corregidas =		2,96%
		99,99%

Sobre la base de este análisis podemos utilizar la ecuación 13:

$$P.C. \text{ total} = 14490 \times 0,7972 + 61000 \times 0,0454 + 5550 \times 0,0096 = 14374$$

$$P.C. \text{ total} = 14374 \text{ BTU/lb. (64-2)}$$

3.

Para el método de Uehling utilizamos la tabla que aparece en el punto 3 del ejercicio 63, la cual nos relaciona la potencia calorífica por libra de C total para una determinada calidad de carbón.

Para el carbón bituminoso este valor es = 17900 BTU/lb. de C total.

$$P.C. \text{ total} = 17900 \times 0,7992 = 14269$$

$$P.C. \text{ total (Uehling)} = 14269 \text{ BTU/lb de C total (64-3)}$$

4.

La tabla de Uehling presenta para el carbón bituminoso, H_u = 0,054 lb/lb de C total.

$$H_{\text{neto}} = 0,7972 \times 0,054 = 0,043$$

$$H_{\text{neto}} = 4,30\% \text{ (64-4)}$$

5.

La ecuación 14 nos permite el cálculo de la potencia calorífica neta por el método de Uehling

$$P.C. \text{ neta} = P.C. \text{ total} - 8,94 \times H \times 1050.$$

H = fracción en peso del H total, incluyendo el H neto, H de la humedad y el H de agua combinada.

$$H = 4,30 + 2,97 \cdot (2/18) + 7,35 \cdot (2/18) = 5,45\%$$

$$P.C. \text{ neta} = 14270 - 8,94 \times 0,0545 \times 1050 = 13758,4$$

$$P.C. \text{ neta} = 13758 \text{ BTU/lb (64-5)}$$

6.
El análisis mediano ya fue calculado en el punto 2.
Análisis mediano (64-6)

Humedad =	2,97%
H ₂ O (combinada) =	7,35%
Cenizas (corregidas) =	2,56%
C =	79,72%
H _{total} =	4,54%
N =	1,89%
S =	0,96%
	99,99%

EJERCICIO N°65 (8)

En la fabricación del ácido sulfúrico por el método de contacto, se queman piritas de hierro, FeS₂, en aire seco, siendo oxidado el hierro a Fe₂O₃.

El SO₂ que se forma se oxida posteriormente a SO₃ pasando los gases mezclados con aire sobre una masa catalítica de negro de platino a temperatura conveniente.

Hay que suponer que en la operación se suministra aire suficiente para quemar las piritas, de forma que el oxígeno estará en un 40% de exceso del necesario para quemar las piritas, de forma que el oxígeno estará en un 40% de exceso del necesario para que todo el azufre que realmente se quema, fuese oxidado a trióxido.

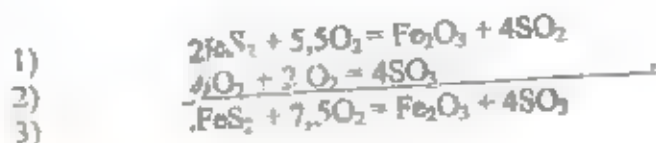
De las piritas cargadas, se pierde el 15% por caerse de la parrilla con la escoria y no se quema.

PREGUNTAS

1. Calcúlese el peso de aire que ha de utilizarse por 100 libras de piritas cargadas.
2. En el quemador y en una columna de contacto conectada con él, el 40% del azufre quemado se convierte a SO₃. Calcúlese la composición en peso, de los gases que salen de la columna de contacto.
3. Por medio de la masa catalítica de platino, el 96% del SO₂ que aun queda en los gases que salen de la columna de contacto se convierten a SO₃. Calcúlese el peso total del trióxido de azufre formado por 100 libras de piritas cargadas.
4. Suponiendo que todos los gases que proceden de la columna de contacto pasan por el catalizador calcúlese la composición en peso de los productos gaseosos que resultan.
5. Calcúlese el grado total de conversión a SO₃ en los productos finales del azufre de las piritas cargadas.

SOLUCION

1.
Reacciones



FeS₂ = 100 libras

Sobre la base de la ecuación:

$$\text{O}_2 = 100 (7,5/2) = 375 \text{ lbs.}$$

$$\text{Aire teórico a partir de este} = 375 / 0,232 = 1616,33 \text{ lbs.}$$

$$\text{Aire real} = 1616,33 \times 1,4 = 2262,86 \text{ lbs.}$$

Dado que solo se pierde el 15% de pirita:

$$\text{Aire real} = 603,45 \times 0,85 = 512,93 \text{ lbs.}$$

$$\text{Aire real} = 512,93 \text{ lbs. (65-1)}$$

2.

$$\text{SO}_2 \text{ total formado} = 100 \times 0,85 \times (4 \times 64 / 2 \times 120) = 90,67 \text{ lbs.}$$



$$\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 = 90,67 \times 0,4 = 36,27 \text{ lbs.}$$

$$\text{SO}_2 \rightarrow \text{gas} = 90,67 - 36,27 = 54,40 \text{ lbs.}$$

$$\text{SO}_3 = 36,27 \cdot (80/64) = 45,34 \text{ lbs.}$$

$$\text{O}_2 \text{ que reacciona} = 36,27 \cdot (2 \times 32 / 4 \times 64) = 9,07 \text{ lbs.}$$

$$\text{O}_2 \text{ reacción I} = 85 \cdot (5,5 \times 32 / 2 \times 120) = 62,34 \text{ lbs.}$$

$$\text{N}_2 = 512,93 \times 0,768 = 393,93 \text{ lbs.}$$

$$\text{O}_2 \rightarrow \text{gas} = 512,93 - 393,93 - 9,07 - 62,34 = 47,59 \text{ lbs.}$$

Composición del gas en peso (65-2)

$$\text{SO}_2 = 54,40 \text{ lbs} = 10,05\%$$

$$\text{SO}_3 = 45,34 \text{ lbs} = 8,38\%$$

$$\text{O}_2 = 47,59 \text{ lbs} = 8,79\%$$

$$\text{N}_2 = 393,93 \text{ lbs} = 72,78\%$$

$$541,26 \text{ lbs} = 100,00\%$$

3.

$$\text{SO}_3 \text{ total} = 54,40 \times 0,96 \cdot (80/64) + 45,34 = 110,62 \text{ lbs}$$

$$\text{SO}_3 \text{ total} = 110,62 \text{ lbs (65-3)}$$

4.

$$\text{O}_2 \text{ consumido en el catalizador} = 54,40 \times 0,96 \cdot (2 \times 32 / 4 \times 64) = 13,06 \text{ lbs}$$

Composición del gas en peso (65-4)

$$\text{SO}_2 = 54,40 \times 0,04 = 2,18 \text{ lbs} = 0,40\%$$

$$\text{SO}_3 = 110,62 \text{ lbs} = 20,44\%$$

$$\text{O}_2 = 47,59 - 13,06 = 34,53 \text{ lbs} = 6,36\%$$

$$\text{N}_2 = 393,93 \text{ lbs} = 72,78\%$$

$$541,26 \text{ lbs} = 100,00\%$$

5.

$$\text{S cargado en piritas} = 100 \cdot (64 / 120) = 53,34 \text{ lbs.}$$

$$\text{S en SO}_3 \text{ al final} = 110,62 \cdot (32/80) = 44,25 \text{ lbs.}$$

$$\text{Grado de conversión} = 44,25 / 53,34 = 0,8296$$

$$\text{Grado de conversión} = 82,96\% \text{ (65-5)}$$

EJERCICIO N°66 (8)

En el proceso Deacon para producción de cloro, una mezcla seca de ácido clorhídrico gaseoso y aire, se pasa por un catalizador caliente que produce la oxidación del ácido.

El aire utilizado está en un 30% de exceso del que se necesita teóricamente

PREGUNTAS

1. Calcúlese el peso de aire suministrado por libra de ácido.
2. Calcúlese la composición en peso del gas que entra a la cámara de reacción
3. Suponiendo que en el proceso se oxida el 60% del ácido, calcúlese la composición en peso de los gases que salen de la cámara.

SOLUCION

1

Reacción.



Para 1 libra de HCl:

$$\text{O}_2 = 1 \cdot (359 \times 0,5 / 2 \times 36,3) = 2,459 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 2,459 / 0,21 = 11,709 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire suministrado} = 11,709 \times 1,3 = 15,222 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire suministrado} = 15,222 \cdot (29/359) = 1,229 \text{ lbs.}$$

$$\text{Aire suministrado} = 1,23 \text{ lbs (66-1)}$$

2

Gas que entra a la cámara de reacción (66-2)

$$\text{N}_2 = 1,2296 \times 0,768 = 0,9443 \text{ lbs} = 42,35\%$$

$$\text{O}_2 = 1,2296 \times 0,232 = 0,2853 \text{ lbs} = 12,80\%$$

$$\text{HCl} = \frac{1,0000 \text{ lbs}}{2,2296 \text{ lbs}} = 44,85\%$$

$$2,2296 \text{ lbs} = 100,00\%$$

3.

Se le carga la misma cantidad de aire, pero solo se oxida el 60% del HCl

$$\text{O}_2 \text{ para oxidación} = 0,6 \cdot (16/2 \times 36,5) = 0,1315 \text{ lbs}$$

$$\text{O}_2 \rightarrow \text{gas} = 15,222 \times 0,21 \cdot (32/359) = 0,1534 \text{ lbs.}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,60 \cdot (18/2 \times 36,5) = 0,1479 \text{ lbs}$$

$$\text{Cl}_2 = 0,60 \cdot (71/2 \times 36,5) = 0,5836 \text{ lbs.}$$

Composición del gas que sale (66-3)

$$\text{N}_2 = 0,9443 \text{ lbs} = 42,37\%$$

$$\text{O}_2 = 0,1534 \text{ lbs} = 6,88\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,1479 \text{ lbs} = 6,63\%$$

$$\text{Cl}_2 = 0,5836 \text{ lbs} = 26,94\%$$

$$\text{HCl} = \frac{0,4000 \text{ lbs}}{2,2292 \text{ lbs}} = 17,94\%$$

$$2,2292 \text{ lbs} = 100,00\%$$

EJERCICIO N°67 (8)

Un carbón que tiene un 87% de carbono total y un 7% de hidrogeno no oxidado, se quema en aire.

PREGUNTAS

1. Si se utiliza un 40% de aire en exceso del teóricamente requerido, calcúlese el número de libras de aire empleado por libra de carbón cargado.
2. Calcúlese la composición en peso de los gases que salen del horno, supuesta la combustión completa.

SOLUCION

1.

Reacción de combustión:



Si partimos de 1 libra carbón:

$$C = 0,87 \text{ lbs}$$

$$O_2 \text{ del } C = 0,87 \cdot (359/12) = 26,03 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 26,03/0,21 = 123,94 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 123,94 \times 1,4 = 173,52 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 173,52 \cdot (29/359) = 14,02$$

$$\text{Aire total} = 14,02 \text{ lbs/lb. de carbón (67-1)}$$

2

Gases que salen (67-2)

$$O_2 = (173,52 - 123,94) \times 0,21 \cdot (32/359) = 0,93 \text{ lbs} = 6,25\%$$

$$H_2 = 0,07 \text{ lbs} = 0,47\%$$

$$CO_2 = 0,87 \cdot (44/12) = 3,19 \text{ lbs} = 21,44\%$$

$$N_2 = 173,52 \times 0,79 \cdot (28/359) = 10,69 \text{ lbs} = 71,84\%$$

$$14,88 \text{ lbs} = 100,00\%$$

EJERCICIO N°68 (8)

Ha de proyectarse un horno para quemar coque a la velocidad de 200 libras por hora. El coque tiene la siguiente composición:

C	89,1%
Cenizas	10,9%

La eficiencia de la parrilla del horno es tal que se quema el 90% del carbono presente en la carga de coque.

Se suministra aire en exceso del 30% del necesario para la combustión completa de todo el carbono de la carga.

Se supone que el 97% del carbono se oxida a dióxido, formando monóxido el restante

PREGUNTAS

1. Calcular la composición en volumen de los gases de chimenea que salen del horno
2. Si los gases de chimenea abandonan el horno a la temperatura de 550°F y a una presión de 743 mm Hg, calcúlese la velocidad de flujo de los gases, en pies cúbicos por minuto, para la cual debe proyectarse el tubo de la chimenea.

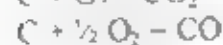
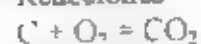
SOLUCION

1.

Supongamos 200 lbs. de coque:

$$C \text{ en coque} = 200 \times 0,891 = 178,2 \text{ lbs.}$$

Reacciones:



$$C \rightarrow CO_2 = 178,2 \times 0,9 \times 0,97 = 155,57 \text{ lbs.}$$

$$C \rightarrow CO = 178,2 \times 0,9 \times 0,03 = 4,81 \text{ lbs.}$$

Si todo el C pasara a CO₂:

$$O_2 \text{ del } C = 178,2 \cdot (359/12) = 5331,15 \text{ ft}^3$$

$$\begin{aligned}\text{Aire teórico} &= 5331,15/0,21 = 25386,43 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire total} &= 25386,43 \times 1,3 = 33002,36 \text{ ft}^3 \\ \text{Aire exceso} &= 33002,36 - 25386,43 = 7616 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

Para las reacciones reales planteadas al principio:

$$\begin{aligned}\text{O}_2 = \text{CO}_2 &= 155,57 - (359/12) = 4654,14 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ para el CO} &= 4,81 (0,5 \times 359/12) = 71,95 \text{ ft}^3 \\ \text{CO} = 2\text{O}_2 \text{ para CO} &= 2 \times 71,95 = 143,90 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ de estas reacciones} &= 4654,14 + 71,95 = 4726,09 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

Composición del gas (68-1)

$$\begin{aligned}\text{N}_2 &= 4726,09 (79/21) + 7616 \times 0,79 = 23795,74 \text{ ft}^3 = 78,81\% \\ \text{O}_2 &= 7616 \times 0,21 = 1599,36 \text{ ft}^3 = 5,30\% \\ \text{CO}_2 &= 4654,14 \text{ ft}^3 = 15,41\% \\ \text{CO} &= 143,90 \text{ ft}^3 = 0,48\% \\ &= 30193,14 \text{ ft}^3 = 100,00\%\end{aligned}$$

2

Los gases calculados a C.N., representan un flujo de 30193,14 ft³/hr
Gases C.N = 30193,74/60 = 503,23 ft³/min

Cambio de condiciones:

$$\begin{aligned}V_1 &= 503,23 \text{ ft}^3/\text{min} & V_2 &=? \\ P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 743 \text{ mm} \\ T_1 &= 492^\circ\text{R} & T_2 &= 550+460 = 1010^\circ\text{R} \\ V_2 &= 503,23 \cdot (760/743) \cdot (1010/492) = 1056,7 \\ \text{Velocidad de flujo a C.D} &= 1056,7 \text{ ft}^3/\text{min. (68-2)}\end{aligned}$$

EJERCICIO N°69 (8)

El gas procedente de un horno para azufre tiene la siguiente composición, en volumen:

SO ₃	0,8%
SO ₂	7,8
O ₂	12,2
N ₂	79,2

PREGUNTAS

1. Calcúlese el volumen del gas a 600°F y 29,2 pulgadas de Hg, formado por 1 lb a de azufre que se ha quemado.
2. Calcúlese el porcentaje en exceso de oxígeno que se ha formado para la combustión anterior, del necesario para la oxidación completa a SO₃.
3. Calcúlese el volumen de aire suministrado a 10°F y 29,2 pulgadas de mercurio para la combustión, por libra de azufre quemado.

SOLUCION

1.

Cálculo del volumen de gas a C.N:

Recordemos la ecuación (6):

S total en gas = 1 lb.

S/ft³ de gas = S en SO₂ + S en SO₃

Si asumimos 1 ft³ de gas:

$$\begin{aligned}\text{S/ft}^3 \text{ de gas} &= 0,008 \times (32/359) + 0,078 \times (32/359) = 0,00767 \text{ lb/ft}^3 \\ \text{ft}^3 \text{ de gas a C.N} &= 1/0,00767 = 130,45\end{aligned}$$

Cambiamos de condiciones:

$$\begin{aligned} V_1 &= 130,45 \text{ ft}^3 & V_2 &=? \\ P_1 &= 29,92 \text{ in-Hg.} & P_2 &= 29,2 \text{ in-Hg.} \\ T_1 &= 492^\circ\text{R} & T_2 &= 600 + 460 = 1060^\circ\text{R} \\ V_2 &= 130,45 \cdot (29,92/492) \cdot (1060/29,2) = 287,98 \\ \text{Volumen del gas a C.D} &= 288 \text{ ft}^3 \text{ (69-1)} \end{aligned}$$

2

Si todo el S \rightarrow SO₃ \therefore

$$\begin{aligned} \text{S} + 1,5 \text{ O}_2 &\rightarrow \text{SO}_3 \\ \text{O}_2 &= 1 \times (1,5 \times 359/32) = 16,83 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ en exceso} &= 130,45 \times 0,122 = 15,92 \text{ ft}^3 \\ \text{O}_2 \text{ en exceso} &= 15,92/16,83 = 0,9459 \\ \text{O}_2 \text{ en exceso} &= 94,59\% \text{ (69-2)} \end{aligned}$$

3.

A C.N, el volumen de gas producido por libra de S quemado = 130,45 ft³
 Aire a C.N = 130,45 \cdot (0,792/0,79) = 130,78 ft³

Cambio de condiciones

$$\begin{aligned} V_1 &= 130,78 \text{ ft}^3 & V_2 &=? \\ P_1 &= 29,92 \text{ in} & P_2 &= 29,2 \text{ in} \\ T_1 &= 492^\circ\text{R} & T_2 &= 460 + 10 = 470^\circ\text{R} \\ V_2 &= 130,78 \cdot (29,92/492) \cdot (470/29,2) = 128,01 \\ \text{Volumen de aire a C.D} &= 128 \text{ ft}^3 \text{ (69-3)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°70 (11)

Un gas combustible que contiene 40%CO, 10%CO₂ y 50%N₂ (en volumen), es quemado completamente con aire en un horno.

Las temperaturas de entrada y de salida de los gases en el horno son 500°C y 977°C, respectivamente.

PREGUNTAS

1. Calcular la máxima temperatura de la llama.

SOLUCION

1

Algunos datos:

Calores de formación a 25°C (298K), = ΔH°_{298} (cal/mol):

$$\Delta H^\circ_{298}, \text{CO} = -29400$$

$$\Delta H^\circ_{298}, \text{CO}_2 = -94000$$

Capacidades caloríficas, C_p (cal/mol.K):

$$C_p, \text{CO} = 6,8 + 0,95 \times 10^{-3}T - 0,1 \times 10^{-5}T^2$$

$$C_p, \text{CO}_2 = 10,6 + 2,2 \times 10^{-3}T - 2,0 \times 10^{-5}T^2$$

$$C_p, \text{O}_2 = 7,15 + 0,98 \times 10^{-3}T - 0,4 \times 10^{-5}T^2$$

$$C_p, \text{N}_2 = 6,7 + 1,0 \times 10^{-3}T$$

Vamos a utilizar la ecuación (7) para calcular el contenido de calor con que los gases entran al horno.

$$CO = \int_{298}^{T_m} (6.8 + 0.95 \times 10^{-3} T - 0.1 \times 10^{-5} T^2) dT = 1380.4 \text{ Cal}$$

$$CO_2 = 0.1 \int_{298}^{T_m} (10.6 + 2.2 \times 10^{-3} T - 2.0 \times 10^{-5} T^2) dT = 518.2 \text{ Cal}$$

$$N_2 = 0.5 \int_{298}^{T_m} (6.7 + 1.0 \times 10^{-3} T) dT = 1718.4 \text{ Cal}$$

$$\text{Calor de entrada del gas} = 1380.4 + 518.2 + 1718.4 = 3617 \text{ Cal.}$$

Calor generado por la combustión:



$$\Delta H_{298}^\circ = \Delta H_{298}^\circ, CO + \Delta H_{298}^\circ, CO_2$$

$$\Delta H_{298}^\circ = -94000 + 26400 = -67600 \text{ cal.}$$

$$\text{Productos de combustión} = CO_2(\text{combustible}) + CO_2(\text{reacción}) + N_2(\text{combustible}) + N_2(\text{aire})$$

$$O_2 \text{ de reacción} = 0.4 \times 0.5$$

$$P.C = 0.1 + 0.4 + 0.5 + 0.5 \times 0.4 \cdot (79/21) = 1.7524 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 0.4 \times 0.5 / 0.21 = 0.9524 \text{ ft}^3$$

$$N_2, \text{aire} = 0.7524 \text{ ft}^3; O_2, \text{aire} = 0.2 \text{ ft}^3$$

Calor de entrada del aire:

$$N_2 = 1718.4 \cdot (0.7524 / 0.5) = 2585.85 \text{ Cal.}$$

$$O_2 = 0.2 \int_{298}^{T_m} (7.15 + 0.98 \times 10^{-3} T - 0.2 \times 10^{-5} T^2) dT = 713 \text{ Cal}$$

$$\text{Total calor de entrada} = 3617 + 2585.85 + 713 = 6916 \text{ Cal.}$$

$$\text{Total calor disponible} = 6916 + 67600 = 74516 \text{ Cal}$$

$$\text{Total calor disponible} = \text{Calor en productos de combustión}$$

Si T_m = temperatura de la llama:

$$\text{Calor en los P.C} = \int_{298}^{T_m} \sum C_p, P.C. dT$$

$$\sum C_p, P.C = C_p, CO_2 + C_p, N_2$$

$$\sum C_p, P.C = 17.3 + 3.2 \times 10^{-3} T - 2.0 \times 10^{-5} T^2$$

$$74516 = 1.7524 \int_{298}^{T_m} (17.3 + 3.2 \times 10^{-3} T - 2.0 \times 10^{-5} T^2) dT$$

$$74516 = 30.3165 T_m + 2.804 \times 10^{-3} T^2 + 3.505 \times 10^{-5} T_m^3 - 10459$$

Si despreciamos T_m^3 , nos resulta:

$$T_m = 2310 \text{ K} = 2037^\circ \text{C}$$

$$\text{Temperatura máxima de la llama} = 2037^\circ \text{C} (70-1)$$

CAPITULO V ,
PRODUCCION DE COQUE Y GAS

EJERCICIO N°1 (7)

El carbon es convertido en coque, y las respectivas composiciones se presenta a continuación:

Carbon		Coque	
(%)		(%)	
C	76,3	C	90,8
H	5,4	H	0,4
O	8,8	O	0,9
N	1,8	S	1,0
S	1,2	R	6,9
H ₂ O	1,9		
R	4,6		

PREGUNTAS

1. El peso del coque por tonelada de carbon.
2. La potencia calorifica baja de cada uno.
3. El porcentaje del calor original del carbon, que puede ser obtenido quemando el coque.
4. Calcular el volumen de los productos de combustión, si el coque es quemado con 40% de aire en exceso. El aire está a 27°C, 760 mm de presión y con 60% de humedad

SOLUCION

1.

Las cenizas y el residuo (R) del carbon, permanecen en el coque, por esta razon, se puede escribir la siguiente expresion:

$$\text{Peso de R en carbon} = \text{Peso de R en coque} \quad (1)$$

$$\text{Peso de R en carbon} = \%R \text{ en carbon} \times \text{peso del carbon}$$

$$\text{Peso de R en coque} = \%R \text{ en coque} \times \text{peso del coque.}$$

$$0,046 \times 1000 = 0,069 \times \text{peso del coque}$$

$$\text{Peso del coque} = 1000 \times 0,046 / 0,069 = 667$$

$$\text{Peso del coque} = \text{Kg. } 667 \text{ (1-1)}$$

2

Potencia calorifica baja (P.C.B).

$$\text{P.C.B} = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W)$$

Para el carbon.

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,763 + 34000(0,054 - 0,088/8) + 2200 \times 0,012 - 586(9 \times 0,054 + 0,019)$$

7372

$$\text{P.C.B para el carbon} = 7372 \text{ Kcal/Kg. (1-2)}$$

Para el coque:

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,908 + 34000(0,0004 - 0,009/8) + 2200 \times 0,01 - 586(9 \times 0,004 + 0)$$

= 7455

$$\text{P.C.B para el coque} = 7455 \text{ Kcal/Kg. (1-2)}$$

La potencia calorifica obtenida para el coque viene expresada para 1 Kg, pero 1 Kg de carbon solo produce 0,667 kg de coque, por tanto, la potencia calorifica del coque habra que multiplicarla por este valor = $7455 \times 0,667$

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque y los metros cúbicos de gas producidos, a partir de 1 tonelada métrica de carbón.
2. ¿Cuántos metros cúbicos de aire serían necesarios, teóricamente, para quemar 1 metro cúbico de gas?

SOLUCION

1.

Peso de R en carbón = Peso de R en coque:

$$0,05 \times 1000 = 0,08 \times \text{peso del coque} \therefore$$

$$\text{Peso del coque} = 0,05 \times 1000 / 0,08 = 625 \text{ kg.}$$

$$\text{Peso del coque} = 625 \text{ Kg. (2-1)}$$

Para calcular el volumen de gas producido, utilizaremos la siguiente ecuación

$$\text{Volumen de gas} = \frac{\text{C total en gas}}{\text{C m}^3 \text{ de gas}} \quad (2)$$

$$\text{C total en gas} = \text{C en carbón} - \text{C en coque}$$

$$\text{C total en gas} = 1000 \times 0,8 - 625 \times 0,92 = 225 \text{ Kg.}$$

Para encontrar el peso (kilogramos) de C en 1 m³ de gas. El volumen de CH₄ es 0,35 m³, y puesto que 22,4 m³ de CH₄ contienen 12 Kg. de C, 1 m³ de CH₄ contiene 12/22,4 Kg. de C y el C₂H₄ presente contiene 0,35 (12/22,4) = 0,1875 Kg. Similarmente el C₂H₂ (que tiene 2 átomos de C) debe contener 0,04 x 2 x (12/22,4) = 0,0428 Kg. De esta manera se puede proceder con todos los demás constituyentes del gas que contengan C.

El cálculo se hace más rápido, sumando primero los porcentajes multiplicados por los respectivos átomos de C, y esta suma multiplicarla por 12/22,4 que es un factor común, veamos

C en 1 m³ de gas:

$$\text{En C}_2\text{H}_2 = 2 \times 0,04 = 0,08$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,35 = 0,35$$

$$\text{En CO} = 1 \times 0,08 = 0,08$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,04 = \frac{0,04}{0,55}$$

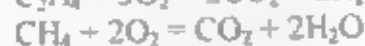
$$\text{C/m}^3 \text{ de gas} = 0,55 \times (12/22,4) = 0,2948 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 225 / 0,2948 = 764 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas producido} = 764 \text{ m}^3 \text{ (2-1)}$$

2.

Reacción de combustión



Cálculo del oxígeno para el aire teórico:

$$\text{O}_2 \text{ del C}_2\text{H}_2 = 0,04 \times 3 = 0,12 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del CH}_4 = 0,35 \times 2 = 0,70 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del CO} = 0,08 \times 0,5 = 0,04 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del H}_2 = 0,44 \times 0,5 = \frac{0,22 \text{ m}^3}{1,08 \text{ m}^3}$$

$$\text{Total O}_2 = 1,08 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 1,08 / 0,21 = 5,14 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico} = 5,14 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas (2-2)}$$

EJERCICIO N°3 (7)

El coque producido en una planta para coque con recuperacion de subproductos, presenta el siguiente análisis:

C	88,2%
H	0,2
R	11,6

El carbón utilizado, presenta el siguiente análisis:

C	75,2%	N	3,5%
H	3,5	H ₂ O	4,6
R	7,4	O	5,8

El análisis (seco) del gas producido, fue el siguiente:

H ₂	56,4%	CO ₂	1,7%
CH ₄	28,2	CO	6,1
C ₂ H ₄	2,2	O ₂	0,5
C ₆ H ₆	0,8	N ₂	4,1

El alquitrán obtenido por tonelada de carbón, lleva 107 libras de carbono, y otros productos 4 libras de C.

PREGUNTAS

1. Calcular las libras de coque producido, a partir de 2000 libras de carbón.
2. Calcular los pies cúbicos de gas (seco) producido, a partir de 1 tonelada de carbón.
3. Calcular el porcentaje del calor original del carbón que está presente en el coque.
4. Calcular el porcentaje del calor original del carbón que está presente en el gas.

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = peso de R en carbón

$$0,116 \times \text{Peso del coque} = 0,074 \times 2000$$

$$\text{Peso del coque} = 0,074 \times 1000 / 0,116 = 1275 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso del coque} = 1275 \text{ lbs. (3-1)}$$

2.

Vamos a utilizar la ecuación (2):

Cálculo del C que hay en 1 ft³ de gas:

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,282 = 0,282$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,022 = 0,044$$

$$\text{En C}_6\text{H}_6 = 6 \times 0,008 = 0,048$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,017 = 0,017$$

$$\text{En CO} = 1 \times 0,061 = 0,061$$

$$0,452$$

$$C = 0,452 \times (12/359) = 0,0151 \text{ lbs./ft}^3 \text{ de gas}$$

$$C \text{ total en gas} = C \text{ en carbón} - C \text{ en coque} - C \text{ en alquitrán} - C \text{ en otros.}$$

$$C \text{ en carbón} = 2000 \times 0,752 = 1504 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en coque} = 1275 \times 0,882 = 1125 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ total en gas} = 1504 - 1125 - 107 - 4 = 270 \text{ lbs.}$$

$$\text{Gas} = 270 / 0,0151 = 17800 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas} = 17800 \text{ ft}^3 \text{ (3-2)}$$

3

Formula de Dulong

$$P.C.B = 8100C + 8000(H - O/8) + 4000S - 1050(9H + W) \text{ BTU/lb}$$

Para el carbon

$$P.C.B = 14600 \times 0.752 + 81000(0.035 - 0.058/8) + 4000 \times 0 - 1050(9 \times 0.035 + 0.046)$$

$$= 12293 \text{ BTU/lb}$$

Para el coque:

$$P.C.B = 14600 \times 0.882 + 81000(0.002 - 0) - 1050(9 \times 0.002 + 0)$$

$$= 12980 \text{ BTU/lb.}$$

1 libra de carbón produce $1275/2000 = 0,635$ lbs. de coque

$$P.C.B \text{ del coque} = 0,635 \times 12980 = 0,672 \text{ de la del carbon}$$

$$P.C.B \text{ del coque} = 67,2\% \text{ de la del carbón (3-3)}$$

4

Con la ayuda de la Tabla I del Apéndice se puede calcular la potencia calorífica del gas, as

Para 1 ft³ de gas:

$$H_2 = 0,564 \times 290 = 164 \text{ BTU}$$

$$CH_4 = 0,282 \times 962 = 271 \text{ BTU}$$

$$C_2H_4 = 0,022 \times 1627 = 36 \text{ BTU}$$

$$C_6H_6 = 0,008 \times 3763 = 30 \text{ BTU}$$

$$CO = 0,061 \times 341 = 21 \text{ BTU}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 522 \text{ BTU/ft}^3$$

1 lb. de carbón produce $17800/2000 = 8,9$ ft³ de gas

$$P.C.B \text{ del gas} = 8,9 \times 522/12293 = 0,378 \text{ de la del carbon.}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 37,8\% \text{ de la del carbón (3-4)}$$

EJERCICIO N°4 (7)

Un horno para coque con recuperacion de subproductos, utiliza carbon y produce coque la composición de los cuales es la siguiente.

CARBON (%)

C	76,5
H	6,8
O	6,4
N	1,8
H ₂ O	3,0
R	5,5

COQUE (%)

C	91,7
H	0,2
R	8,1

El gas que sale de las retortas, analizado en seco, presenta la siguiente composición

CH ₄	29,0%	H ₂	55,4%
C ₂ H ₄	3,5	N ₂	4,2
CO ₂	1,4	NH ₃	1,4
CO	5,1		

La temperatura del gas al salir de las retortas es de 1000°C.

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de carbón requeridos para producir una tonelada métrica de coque, y los metros cúbicos de gas seco que salen de la retorta, por tonelada métrica de coque producido.
2. Cuando el coque es quemado, ¿qué porcentaje de la potencia calorífica original del carbón es obtenido?
3.
 - a. ¿Qué porcentaje de la potencia calorífica original del carbón está representado por la del gas producido?
 - b. ¿Cuál es el contenido de calor sensible de los gases, tal como ellos salen de la retorta?

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón

$$\text{Peso del carbón} = 1000 \cdot (0,081 / 0,055) = 1473 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del carbón} = 1473 \text{ Kg. (4-1)}$$

C en gases

$$\text{CH}_4 = 1 \times 0,29 = 0,290$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,035 = 0,070$$

$$\text{CO}_2 = 1 \times 0,014 = 0,014$$

$$\text{CO} = 1 \times 0,051 = \underline{0,051}$$

$$0,425$$

$$C = 0,425 \cdot (12/22,4) = 0,2278 \text{ Kg/m}^3 \text{ de gas.}$$

$$C \text{ total en gas} = 1473 \times 0,765 - 1000 \times 0,917 = 210 \text{ Kg.}$$

$$\text{Gas} = 210 / 0,2278 = 917 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas} = 917 \text{ m}^3/\text{ton. de coque (4-1)}$$

2.

Cálculo de las potencias caloríficas para el carbón y el coque, mediante la fórmula de Dulong

$$\text{P.C.B (carbón)} = 8100 \times 0,765 + 34000 (0,068 - 0,0648) + 0,586 (9 \times 0,068 + 0,03) = 7860 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$\text{P.C.B (coque)} = 8100 \times 0,917 + 34000 \times 0,002 - 586 \times 9 \times 0,002 = 7485 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$1 \text{ Kg. de carbón produce } 1000/1473 = 0,679 \text{ Kg. de coque.}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 0,679 (7485/7860) = 0,646 \text{ de la del carbón}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 64,6\% \text{ de la del carbón (4-2)}$$

3.

a.

Cálculo de potencia calorífica del gas (Tabla I):

$$\text{CH}_4 = 0,29 \times 8560 = 2482 \text{ Kcal}$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,035 \times 14480 = 507$$

$$\text{CO} = 0,051 \times 3034 = 155$$

$$\text{H}_2 = 0,554 \times 2582 = 1430$$

$$\text{NH}_3 = 0,014 \times 3565 = \underline{47 \text{ Kcal}}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 4621 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kg. de carbón produce } 917/1473 = 0,623 \text{ m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 0,623 (4621/7860) = 0,366 \text{ de la del carbón}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 36,6\% \text{ de la del carbón (4-3.a)}$$

b.

Sabemos que el contenido de calor de un gas = Volumen x Calor específico x Temperatura (°C)
Este cálculo se realiza con ayuda de la Tabla XV del Apéndice

$$\begin{aligned}
 CH_4 &= 0,29 \cdot (0,380 + 21 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 717 \text{ Kcal} \\
 C_2H_4 &= 0,035 \cdot (0,460 + 30 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 27 \\
 CO_2 &= 0,014 \cdot (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 7 \\
 CO + N_2 &= 0,093 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 30 \\
 H_2 &= 0,554 \cdot (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 178 \\
 NH_3 &= 0,014 \cdot (0,376 + 14 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 7 \text{ Kcal} \\
 \text{Contenido de calor en el gas} &= 420 \text{ Kcal/m}^3 \\
 \text{Calor total en el gas} &= 420 \times 917 = 385140 \text{ Kcal.} \\
 \text{Calor total en el gas} &= 385140 \text{ Kcal (4-3.b)}
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°5 (7)

Los siguientes datos fueron obtenidos de la operación de una planta para coque con recuperación de subproductos de la Lackwanna Steel Company

CARBON UTILIZADO (%)		COQUE PRODUCIDO (%)		GAS PRODUCIDO (análisis seco), %	
C	76,8	C	91,7	CH ₄	28,5
H	3,5	H	0,2	C ₂ H ₄	2,2
O	6,5	R	8,1	C ₆ H ₆	0,7
N	7			CO ₂	1,4
H ₂ O	5,7			CO	5,1
R	5,8			H ₂	56,0
				O ₂	0,5
				N ₂	4,2
				NH ₃	1,4

Por cada tonelada de carbon utilizado, se produjeron 62,2 kilogramos de alquitran cuyo análisis contenía 77,7% C y 16,1% H

PREGUNTAS (por tonelada de carbón cargado)

1. Peso del coque producido.
2. El volumen del gas producido, análisis seco y humedo.
3. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que está presente en el coque
4. Lo mismo para el gas producido.
5. Cuantos kilogramos de benzol (C₆H₆) y de sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄] serian recuperables?

SOLUCION

1

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de R en coque} &= \text{Peso de R en carbón} \\
 \text{Peso del coque} &= 1000 \cdot (0,058 / 0,081) = 716 \text{ Kg.} \\
 \text{Peso del coque} &= 716 \text{ Kg. (5-1)}
 \end{aligned}$$

2

Utilizando la ecuación (2):

$$\begin{aligned}
 C \text{ total en gas} &= C(\text{carbón}) - C(\text{coque}) - C(\text{alquitran}) \\
 C \text{ total en gas} &= 0,768 \times 1000 - 0,917 \times 716 - 0,777 \times 62,2 = 63 \text{ Kg.}
 \end{aligned}$$

Cálculo del C que tiene 1 m³ de gas.

$$\text{En } \text{CH}_4 = 1 \times 0,285 = 0,285$$

$$\text{En } \text{C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,022 = 0,044$$

$$\text{En } \text{C}_6\text{H}_6 = 6 \times 0,007 = 0,042$$

$$\text{En } \text{CO}_2 = 1 \times 0,014 = 0,014$$

$$\text{En } \text{CO} = 1 \times 0,051 = 0,051$$

$$0,436$$

$$\text{C en gas} = 0,436 \cdot (12/22,4) = 0,2335 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 63/0,2335 = 270 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido (análisis seco)} = 270 \text{ m}^3 \text{ (5-2)}$$

Para el cálculo del gas producido, húmedo, se utiliza misma ecuación (2) pero ahora se sustituye el C por el H

Puesto que 1 volumen de CH_4 representa 2 volúmenes de H_2 , 0,285 m³ de CH_4 contienen 0,57 m³ de H_2 , así

$$\text{En } \text{CH}_4 = 0,285 \times 2 = 0,570$$

$$\text{En } \text{C}_2\text{H}_4 = 0,022 \times 2 = 0,044$$

$$\text{En } \text{C}_6\text{H}_6 = 0,007 \times 3 = 0,021$$

$$\text{H}_2 \text{ libre} = 0,560$$

$$\text{En } \text{NH}_3 = 0,014 \times 1,5 = 0,021$$

$$1,216$$

$$\text{H}_2 = 1,216 \cdot (2/22,4) = 0,108 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{H}_2 \text{ libre en carbón} = 0,035 \times 1000 = 35 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2 \text{ en H}_2\text{O del carbón} = 1000 \times 0,057 \cdot (2/18) = 6,32 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total H}_2 \text{ del carbón} = 35 + 6,32 = 41,32 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2 \text{ en coque} = 716 \times 0,002 = 1,43 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2 \text{ el alquitrán} = 62,2 \times 0,161 = 10,01 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2 \text{ total en gas} = 41,32 - 1,43 - 10,01 = 29,88 \text{ Kg.}$$

$$\text{Gas} = 29,88/0,108 = 277 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas, análisis húmedo} = 277 \text{ m}^3 \text{ (5-2)}$$

3

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000 \cdot (\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 586 \cdot (9\text{H} + \text{W}).$$

Para el carbón:

$$\begin{aligned} \text{P.C.B} &= 8100 \times 0,768 + 34000 (0,035 - 0,065/8) + 0 - 586 \cdot (9 \times 0,035 + 0,057) \\ &= 6921 \text{ Kcal/Kg.} \end{aligned}$$

Para el coque:

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,917 + 34000 (0,002 - 0) + 0 - 586 \times 0,002 = 7485 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 0,716 \times 7485/6921 = 0,775 \text{ de la del carbón.}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 77,5\% \text{ de la del carbón (5-3)}$$

4

Potencia calorífica del gas.

$$\text{CH}_4 = 0,285 \times 8560 = 2440 \text{ Kcal.}$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,022 \times 14480 = 319$$

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 0,007 \times 33490 = 234$$

$$\text{CO} = 0,051 \times 3034 = 155$$

$$\text{H}_2 = 0,56 \times 2582 = 1446$$

$$\text{NH}_3 = 0,014 \times 3385 = 47 \text{ Kcal}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 4641 \text{ Kcal/m}^3$$

$$\text{P.C.B del gas} = 0,270 (4641/6921) = 0,179 \text{ de la del carbón}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 17,9\% \text{ de la del carbón (5-4)}$$

5

Pesos moleculares.

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 78$$

$$\text{NH}_3 = 17$$

$$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 132$$

$$\text{C}_6\text{H}_6 \text{ en gas} = 0,007 \times 270 = 1,89 \text{ m}^3$$

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 1,89 (78/22,4) = 6,58 \text{ Kg}$$

$$C_6H_6 \text{ recuperable} = 6,58 \text{ Kg. (5-5)}$$

Reacción de formación del sulfato de amonio:



$$NH_3 \text{ en gas} = 270 \times 0,014 = 3,78 \text{ m}^3$$

$$= 3,78 \cdot (17/22,4) = 2,87 \text{ Kg.}$$

$$(NH_4)_2SO_4 = 2,87 \cdot (132/2 \times 17) = 11,14 \text{ Kg.}$$

$$\text{Sulfato de amonio recuperable} = 11,14 \text{ Kg. (5-5)}$$

EJERCICIO N°6 (7)

El carbon de la siguiente composición, fue tratado en un horno para coque con recuperación de subproductos.

C	78,0%	O	9,0%
H	5,0	N	1,5
R	6,5		

El análisis del coque producido fue el siguiente:

C	89,5%
H	1,0
R	9,5

El gas del horno analizó lo siguiente:

C_6H_6	0,8%	CO_2	3,3%
C_2H_4	3,0	H_2	44,3
CH_4	34,0	N_2	7,2
CO	6,0	NH_3	1,4

En adición, se recobró alquitrán igual al 3,4% del peso del carbon, conteniendo 90% de

PREGUNTAS

- 1 Las libras de carbón requeridas para producir una tonelada larga de coque, y los pies cúbicos de gas producido.
- 2 Las libras de bencol y sulfato de amonio recuperados, por tonelada larga de carbón
- 3 Las potencias caloríficas del carbón, el coque y el gas.
- 4 Los porcentajes de la potencia calorífica del carbon que están presentes en el coque y el gas.

SOLUCION

1

1 tonelada larga = 2240 libras.

Peso de R en coque = Peso de R en carbon.

$$\text{Peso del carbon} = 2240 \cdot (0,095/0,065) = 3270 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso del carbon} = 3270 \text{ lbs. (6-1)}$$

Para el calculo del volumen del gas, utilizamos la ecuacion (2)

$$C \text{ en carbon} = 3270 \times 0,78 = 2551 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en coque} = 2240 \times 0,895 = 2005 \text{ lbs.}$$

$$\text{Alquitran} = 3270 \times 0,034 = 111,18 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en alquitran} = 111,18 \times 0,9 = 100 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total C en gases} = 2551 - 2005 - 100 = 446 \text{ lbs.}$$

C en gas

$$\text{En } C_6H_6 = 6 \times 0,008 = 0,048$$

$$\text{En } C_2H_4 = 2 \times 0,03 = 0,060$$

$$\text{En } CH_4 = 1 \times 0,34 = 0,340$$

$$\text{En } CO = 1 \times 0,06 = 0,060$$

$$\text{En } CO_2 = 1 \times 0,033 = 0,033$$

$$0,541$$

$$C \text{ en gas} = 0,541 \cdot (12/359) = 0,0181 \text{ lbs/ft}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 446/0,0181 = 24641 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas producido} = 24641 \text{ ft}^3 \text{ (6-1)}$$

2

$$\text{Peso del coque} = 2240 \cdot (0,065/0,095) = 1530 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso del alquitran} = 2240 \times 0,034 = 76,16 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en carbón} = 2240 \times 0,78 = 1747 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en coque} = 1530 \times 0,895 = 1369 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en alquitran} = 76,16 \times 0,9 = 69 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ total en gas} = 1747 - 1369 - 69 = 309 \text{ lbs.}$$

$$\text{Gases} = 309/0,0181 = 17072 \text{ ft}^3$$

$$C_6H_6 = 17072 \times 0,008 = 137 \text{ ft}^3$$

$$\text{Benzol recuperado} = 137 \cdot (78/359) = 29,5 \text{ lbs.}$$

$$\text{Benzol recuperado} = 29,5 \text{ lbs (6-2)}$$

Reacción de formación del sulfato de amonio.



$$NH_3 \text{ en gas} = 0,014 \times 17072 \cdot (17/359) = 11,32 \text{ lbs.}$$

$$(NH_4)_2SO_4 = 11,32 \cdot (132/2 \times 17) = 43,94 \text{ lbs.}$$

$$\text{Sulfato de amonio recuperado} = 43,94 \text{ lbs. (6-2)}$$

3

$$P.C.B = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S - 1050 \cdot (9H + W)$$

Para el carbón

$$P.C.B = 14600 \times 0,78 + 61000 \cdot (0,05 - 0,09/8) - 1050 \times 9 \times 0,05 = 13279 \text{ BTU}$$

$$P.C.B \text{ del carbón} = 13279 \text{ BTU/lb (6-3)}$$

Para el coque:

$$P.C.B = 14600 \times 0,895 + 61000 \times 0,01 - 1050 \times 9 \times 0,01 = 13582 \text{ BTU}$$

$$P.C.B \text{ del coque} = 13582 \text{ BTU/lb (6-3)}$$

Para el gas:

$$C_6H_6 = 0,008 \times 3763 = 30 \text{ BTU}$$

$$C_2H_4 = 0,03 \times 1627 = 49$$

$$CH_4 = 0,34 \times 962 = 327$$

$$CO = 0,06 \times 341 = 20$$

$$H_2 = 0,443 \times 290 = 129$$

$$NH_3 = 0,014 \times 380 = 5 \text{ BTU}$$

$$560 \text{ BTU/ft}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 560 \text{ BTU/ft}^3 \text{ (6-3)}$$

4.

1 libra de carbón produce $1530/2240 = 0,685$ lbs de coque.

$$P.C.B \text{ del coque} = 0,685 \cdot (13582/13279) = 0,7 \text{ de la del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del coque} = 70,0\% \text{ de la del carbón (6-4)}$$

1 libra de carbón produce $10072/2240 = 7,58 \text{ ft}^3$ de gas

$$P.C.B \text{ del gas} = 7,58 \cdot (560/13279) = 0,319 \text{ de la del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 31,9\% \text{ de la del carbón (6-4)}$$

EJERCICIO N°7 (7)

Un carbon que fue coquizado en una planta con recuperacion de subproductos, ten a la siguiente composicion

C	77,0%	H	5,0%
H ₂ O	3,0	O	8,0
R	7,0		

El coque resultante presento la siguiente composicion:

C	89,0%
H	1,0
R	10,0

El gas, tal como sale de las retortas, tiene:

H ₂	50,0%	N ₂	1,4%
CH ₄	28,0	CO ₂	2,0
CO	8,0	H ₂ O	6,6
C ₂ H ₄	4,0		

PREGUNTAS

1. El peso del coque y el volumen del gas producidos, por kilogramo de carbon
2. Cuando se quema el coque, que porcentaje de la potencia calorifica original del carbon se obtiene?
3. Cuando se quema el gas, que porcentaje de la potencia calorifica original del carbon se obtiene?
4. ¿Que temperatura se obtiene al quemar el coque bajo las condiciones teoricas?
5. ¿Que temperatura se obtiene cuando el gas combusta bajo condiciones teoricas?

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbon

$$\text{Peso de coque} = 1 \times 0,07 / 0,1 = 0,70$$

$$\text{Peso del coque} = 0,70 \text{ Kg./Kg. de carbon (7-1)}$$

Cálculo del volumen del gas producido por Kg. de carbon:

$$\text{C en carbon} = 0,77 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en coque} = 0,7 \times 0,89 = 0,623 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{gas} = 0,77 - 0,623 = 0,147 \text{ Kg.}$$

Cálculo del contenido de C en 1 m³ de gas:

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,28 = 0,28$$

$$\text{En CO} = 1 \times 0,08 = 0,08$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,04 = 0,08$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,02 = 0,02$$

$$\underline{0,46}$$

$$\text{C/m}^3 \text{ de gas} = 0,46 \cdot (12/22,4) = 0,246 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 0,147 / 0,246 = 0,597 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido} = 0,597 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbon (7-1)}$$

2.

$$P.C.B = 8100C + 34000 \cdot (H - O/8) + 2200S - 586 \cdot (9H + W):$$

Para el carbón,

$$P.C.B = 8100 \times 0,77 + 34000 \cdot (0,05 - 0,08/8) + 0 - 586 \cdot (9 \times 0,05 + 0,03) = 7316 \text{ Kcal/kg.}$$

Para el coque:

$$P.C.B = 8100 \times 0,89 + 34000 \cdot (0,01 - 0) + 0 - 586 \cdot (9 \times 0,01 + 0) = 7496 \text{ Kcal./Kg.}$$

1 Kg. de carbón produce 0,7 Kg. de coque:

$$P.C.B \text{ del coque} = 0,7 \cdot (7496/7316) = 0,717 \text{ de la del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del coque} = 71,7\% \text{ de la del carbón (7-2)}$$

3

Para el cálculo de la potencia calorífica del gas, utilizamos la Tabla L del Apéndice:

$$H_2 = 0,50 \times 2582 = 1291 \text{ Kcal}$$

$$CH_4 = 0,28 \times 8560 = 2397 \text{ Kcal.}$$

$$CO = 0,08 \times 3034 = 243 \text{ Kcal}$$

$$C_2H_4 = 0,04 \times 14480 = \frac{579 \text{ Kcal}}{4510 \text{ Kcal/m}^3}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,597 \cdot (4510/7316) = 0,368 \text{ de la del carbón.}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 36,8\% \text{ de la del carbón (7-3)}$$

4.

Calor disponible = Calor en productos de combustión

Calor disponible = Volumen o peso de los P.C. x Calor específico x Temperatura

Calor disponible en este caso = Potencia calorífica = $7496 \times 0,7 = 5247 \text{ Kcal.}$

Cálculo de los productos de combustión:

$$P.C = CO_2 + H_2O + N_2$$

Reacciones de combustión.



$$O_2 \text{ del C} = 0,7 \times 0,89 \cdot (32/12) = 1,66 \text{ Kg.}$$

$$O_2 \text{ del H} = 0,7 \times 0,01 \cdot (16/2) = 0,056 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total } O_2 \text{ teórico} = 1,66 + 0,056 = 1,716 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire teórico} = 1,716/0,23 = 7,45 \text{ Kg.}$$

$$N_2 = 7,45 \times 0,77 = 5,7 \text{ Kg.}$$

$$CO_2 = 0,7 \times 0,89 \cdot (44/12) = 2,29 \text{ Kg}$$

$$H_2O = 0,7 \times 0,01 \cdot (18/2) = 0,063 \text{ Kg.}$$

La Tabla XV del Apéndice contiene los calores específicos de los gases

El contenido de calor de estos P.C a cualquier temperatura, es el siguiente:

$$N_2 = 5,7 \cdot (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} t) \cdot t = 1,37 t + 10,02 \times 10^{-5} t^2$$

$$CO_2 = 2,3 \cdot (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,47 t + 10,6 \times 10^{-5} t^2$$

$$H_2O = 0,063 \cdot (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 0,03 t + 0,30 \times 10^{-5} t^2$$

$$\text{Total calor a cualquier } t \text{ en P.C} = 1,78 t + 21,01 \times 10^{-5} t^2$$

$$5247 = 21,01 \times 10^{-5} t^2 + 1,78 t$$

$$t = 2250^\circ C$$

$$\text{Temperatura de la llama al quemar el coque} = 2250^\circ C \text{ (7-4)}$$

5.

El cuadro que se muestra a continuación, presenta las reacciones de combustión, el oxígeno consumido y los productos de combustión resultantes de quemar $0,597 \text{ m}^3$ de gas

Reacciones	O ₂ + P.C. (m ³ 0,59 m ³ de gas)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
H ₂ + 1/2 O ₂ = H ₂ O	0,1493		0,2985	---
H ₂ + 2 1/2 O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	0,3343	0,1672	0,3343	---
C + 1/2 O ₂ = CO	0,0239	0,0478	---	---
C + 1/2 O ₂ = CO ₂	0,0716	0,0478	0,0478	---
C ₁₀ H ₈ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	---	---	---	0,0084
N	---	0,0119	---	---
O	---	---	0,0394	---
H ₂ O	---	---	0,7200	0,0084
Totales	0,5791	0,2747	0,7200	

$$\text{Aire teórico} = 0,5791/0,21 = 2,7576 \text{ m}^3$$

$$P.C. = N_2 + CO_2 + H_2O$$

$$N_2 \text{ total} = 2,7576 \times 0,79 + 0,0084 = 2,1869 \text{ m}^3$$

Cálculo del contenido de calor de los P.C. a cualquier temperatura.

$$N_2 = 2,1869 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$H_2O = 0,72 \cdot (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$CO_2 = 0,2747 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$\Sigma =$$

$$1,0405 t + 1,088 \times 10^{-4} t^2$$

$$P.C.B. \text{ del gas} = 0,597 \times 4510 = 2692,5 \text{ Kcal.}$$

$$1,088 \times 10^{-4} t^2 + 1,0405 t - 2692,5 = 0$$

$$t = 2118,4^\circ\text{C}$$

Temperatura obtenida al quemar el gas = 2118,4°C (7-5)

EJECICIO N°8 (7)

Los siguientes son los datos obtenidos de un horno para coque con recuperación de subproductos, que opera con un carbon de Cape Breton, Nova Scotia

CARBÓN (%)		COQUE (%)		ALQUITRAN (%)		GAS (%)	
C	76,6	C	87,1	C	89,0	C ₆ H ₆	0,8
H	5,1	H	1,1	H	5,0	C ₂ H ₄	3,0
O	7,2	O	1,9	N	1,0	CH ₄	3,1
N	2,5	N	0,7			CO	9,0
S	2,8	S	1,0			CO ₂	6,0
R	5,8	R	8,2			H ₂	38,5
						N ₂	4,4
						O ₂	1,3

El peso del alquitran producido equivale al 3,38% del peso del carbon utilizado. El 20% del nitrógeno del carbón se recupera como amonio.

PREGUNTAS

1. Las libras de coque producido, por tonelada corta de carbon
2. Los pies cúbicos de gas producidos, por tonelada de carbon
3. El porcentaje de distribución del carbono y el hidrógeno del carbón en el coque, el alquitran y el gas.
4. La fuga de aire hacia el gas, por tonelada de carbón
5. Cuántas libras de benzol y de (NH₄)₂SO₄ pueden ser obtenidas a partir del gas, por tonelada de carbón?

SOLUCION

1.

1 tonelada corta = 2000 libras.

Peso de R en coque = Peso de R en carbón

$$\text{Peso del coque} = 2000 \cdot (0,058/0,082) = 1415 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso del coque producido} = 1415 \text{ lbs (8-1)}$$

2

Utilizamos la ecuación (2)

$$\text{C en carbón} = 2000 \times 0,766 = 1532 \text{ lbs.}$$

$$\text{C en coque} = 1415 \times 0,871 = 1233 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso del Alquitrán} = 2000 \times 0,0338 = 68 \text{ lbs.}$$

$$\text{C en alquitrán} = 68 \times 0,89 = 60 \text{ lbs.}$$

$$\text{C total en gases} = 1532 - 1233 - 60 = 239 \text{ lbs.}$$

Cálculo del C que hay en 1 ft³ de gas:

$$\text{En } C_6H_6 = 6 \times 0,008 = 0,048$$

$$\text{En } C_2H_4 = 2 \times 0,030 = 0,060$$

$$\text{En } CH_4 = 1 \times 0,34 = 0,340$$

$$\text{En } CO = 1 \times 0,09 = 0,090$$

$$\text{En } CO_2 = 1 \times 0,06 = 0,060$$

$$\underline{0,598}$$

$$\text{C en gas} = 0,598 \cdot (12/359) = 0,01999 \text{ lbs/ft}^3$$

$$\text{Gas} = 239/0,01999 = 11956 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas} = 11956 \text{ ft}^3/\text{ton de carbón (8-2)}$$

3

$$\text{C en coque} = 1233/1532 = 0,804 \text{ del C del carbón}$$

$$\text{C en coque} = 80,4\% \text{ del C del carbón (8-3)}$$

$$\text{C en alquitrán} = 60/1532 = 0,039 \text{ del C del carbón}$$

$$\text{C en alquitrán} = 3,9\% \text{ del C del carbón (8-3)}$$

$$\text{C en gas} = 1 - 0,804 - 0,039 = 0,157 \text{ del C del carbón.}$$

$$\text{C en gas} = 15,7\% \text{ del C del carbón (8-3)}$$

$$\text{H en carbón} = 2000 \times 0,051 = 102 \text{ lbs}$$

$$\text{H en coque} = 1415 \times 0,011 = 15,6 \text{ lbs.}$$

$$\text{H en coque} = 15,6/102 = 0,153 \text{ del H del carbón}$$

$$\text{H en coque} = 15,3\% \text{ del H del carbón (8-3)}$$

$$\text{H en alquitrán} = 68 \times 0,05 = 3,4 \text{ lbs.}$$

$$\text{H en alquitrán} = 3,4/102 = 0,033 \text{ del H del carbón}$$

$$\text{H en alquitrán} = 3,3\% \text{ del H del carbón (8-3)}$$

Cálculo del H₂ en 1 ft³ de gas.

$$\text{En } C_6H_6 = 3 \times 0,008 = 0,024$$

$$\text{En } C_2H_4 = 2 \times 0,030 = 0,060$$

$$\text{En } CH_4 = 2 \times 0,034 = 0,680$$

$$\text{H}_2 \text{ libre} = 1 \times 0,385 = 0,385$$

$$\text{H}_2 \text{ en gas} = 1,149 \text{ ft}^3/\text{ft}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{H}_2 \text{ total en gas} = 1,149 \times 11956 = 13737 \text{ ft}^3$$

$$\text{H total en gas} = 13737 \cdot (2/359) = 76,5 \text{ lbs.}$$

$$\text{H en gas} = 76,5/102 = 0,75$$

$$\text{H en gas} = 75\% \text{ del H del carbón (8-3)}$$

$$\text{Gas} = 11956 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO} = 11956 \times 0,09 = 1076 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 = 11956 \times 0,06 = 717 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 = 11956 \times 0,013 = 155 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del carbón} = 2000 \times 0,072 \cdot (359/32) = 1615,5 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del coque} = 1415 \times 0,019 \cdot (359/32) = 301,6 \text{ ft}^3$$

Reacciones.

$$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 \cdot \text{O}_2 = \text{CO}_2 = 717 \text{ ft}^3$$

$$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO} \cdot \text{O}_2 = \frac{1}{2} \text{CO} = 1076/2 = 538 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ en productos} = 301,6 + 717 + 538 + 155 = 1711,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 1711,6 - 1615,5 = 96,1 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} \rightarrow \text{gas} = 96,1/0,21 = 457,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} \rightarrow \text{gas} = 457,6 \text{ ft}^3 \text{ (8-4)}$$

5

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 11956 \times 0,008 \cdot (78/359) = 20,8 \text{ lbs.}$$

$$\text{Benzol obtenido del gas} = 20,8 \text{ lbs. (8-5)}$$

Reacción de formación del sulfato de amonio:



$$\text{N del carbón} = 2000 \times 0,025 = 50 \text{ lbs.}$$

$$\text{N} \rightarrow \text{NH}_3 = 50 \times 0,2 = 10 \text{ lbs.}$$

$$\text{NH}_3 = 10 \cdot (17/14) = 12,14 \text{ lbs.}$$

$$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = 12,14 \cdot (132/2 \times 17) = 47,13 \text{ lbs.}$$

$$\text{Sulfato de amonio obtenido} = 47,13 \text{ lbs. (8-5)}$$

EJERCICIO N°9 (7)

Un carbón de Pocahontas en West Virginia fue utilizado en un horno de coque para coque

CARBÓN UTILIZADO (%)		COQUE PRODUCIDO (%)		GASES DESECHADOS (secados), (%)	
C	84,7	C	89,3	CO ₂	14,6
H	4,1	H	0,2	CO	6,4
O	3,6	O	0,2	CH ₄	2,4
N	1,0	N	0,3	H ₂	3,7
S	0,7	S	0,7	N ₂	68,7
H ₂ O	1,0	H ₂ O	0,6	H ₂ O	4,8
R	4,9	R	8,7		

PREGUNTAS

- 1 Los kilogramos de coque producidos, por tonelada de carbón
- 2 Los metros cúbicos de gas producidos, por tonelada de carbón
- 3 Los metros cúbicos de aire utilizados, por tonelada de carbón (utilizar el método del nitrógeno y el del oxígeno).
- 4 El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón, que se encuentra presente en el coque
- 5 Lo mismo para los gases.
- 6 El porcentaje de distribución del carbón y el del hidrógeno, entre el coque y el gas

SOLUCION

1

Peso de R en coque = Peso de R en carbón

$$\text{Peso del coque} = 1000 \cdot (0,049/0,087) = 563 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del coque} = 563 \text{ Kg. (9-1)}$$

2

Utilizamos la ecuación (2):

$$\text{C en carbón} = 1000 \times 0,847 = 847 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en coque} = 563 \times 0,893 = 503 \text{ Kg.}$$

$$\text{C total en gas} = 847 - 503 = 344 \text{ Kg.}$$

Cálculo del contenido de C en 1 m³ de gas:

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,14 = 0,140$$

$$\text{En CO} = 1 \times 0,064 = 0,064$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,024 = 0,024$$

$$0,228$$

$$\text{C en gas} = 0,228 \cdot (12/22,4) = 0,122 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 344/0,122 = 2820 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas} = 2820 \text{ m}^3 \text{ (9-2)}$$

3.

Método del nitrógeno.

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 0,687 \times 2820 = 1937 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ del carbón} = 1000 \times 0,01 \cdot (22,4/28) = 8 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ del aire} = 1937 - 8 = 1929 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1929/0,79 = 2442 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire por el método del nitrógeno} = 2442 \text{ m}^3 \text{ (9-3)}$$

Método del oxígeno.

$$\text{O}_2 \text{ en gas} = (0,14 + 0,064/2 + 0,048/2) \times 2820 = 552,72 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ de carbón} = 1000 \times [(0,036 - 0,01 \times 16/18)] (22,4/32) = 31,42 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 552,72 - 31,42 = 521,3 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 521,3/0,21 = 2482 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire por el método del oxígeno} = 2482 \text{ m}^3 \text{ (9-3)}$$

4

Cálculo de la potencia calorífica baja con la fórmula de Dulong.

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000 (\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 586 \cdot (9\text{H} + \text{W})$$

Para el carbón.

$$\begin{aligned} \text{P.C.B} &= 8100 \times 0,847 + 34000 (0,041 - 0,036/8) + 2200 \times 0,007 - 586 (9 \times 0,041 + 0,01) \\ &= 7895 \text{ Kcal/Kg.} \end{aligned}$$

Para el coque

$$\begin{aligned} \text{P.C.B} &= 8100 \times 0,893 + 34000 (0,002 - 0,002/8) + 2200 \times 0,007 - 586 (9 \times 0,002 + 0,006) \\ &= 7294 \text{ Kcal/Kg.} \end{aligned}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 0,563 \cdot (7294/7895) = 0,52 \text{ de la del carbón.}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 52,0\% \text{ de la del carbón (9-4)}$$

5

Cálculo de la potencia calorífica del gas.

$$\begin{aligned} \text{CO} &= 0,064 \times 3034 = 194 \text{ Kcal.} \\ \text{CH}_4 &= 0,024 \times 8560 = 205 \text{ Kcal.} \\ \text{H}_2 &= 0,037 \times 2582 = \underline{96 \text{ Kcal}} \\ \text{P.C.B del gas} &= \underline{495 \text{ Kcal./m}^3} \\ \text{P.C.B del gas} &= 2,82 \cdot (495/7895) = 0,177 \text{ de la del carbón.} \\ \text{P.C.B del gas} &= 17,7\% \text{ de la del carbón (9-5)} \end{aligned}$$

6

Distribución del C:

$$\begin{aligned} \text{C en coque} &= 503/847 = 0,594 \\ \text{C en coque} &= 59,4\% \text{ del C del carbon (9-6)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{C en gas} &= 344/847 = 0,406 \\ \text{C en gas} &= 40,6\% \text{ del C del carbón (9-6)} \end{aligned}$$

Distribución del H:

$$\begin{aligned} \text{H en carbón} &= 1000 \cdot (0,041 + 0,01 \times 2/18) = 42,111 \text{ Kg.} \\ \text{H en coque} &= 563 \cdot (0,002 + 0,006 \times 2/18) = 1,501 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

H en gas:

$$\begin{aligned} 2\text{H}_2 + \text{C} &= \text{CH}_4 \\ \text{H} &= 2820 \times 0,024 \times 2 \cdot (2/22,4) = 12,086 \text{ Kg.} \\ \text{H libre} &= 2820 \times 0,037 \cdot (2/22,4) = 9,316 \text{ Kg.} \\ \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{H}_2\text{O} \\ \text{H} &= 2820 \times 0,018 \cdot (2/22,4) = 12,086 \text{ Kg.} \\ \text{Total H en gas} &= 12,086 + 9,316 + 12,086 = 33,488 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H en coque} &= 1,501/42,111 = 0,0356 \\ \text{H en coque} &= 3,56\% \text{ del H del carbón (9-6)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H en gas} &= 33,488/42,111 = 0,7952 \\ \text{H en gas} &= 79,52\% \text{ del H del carbon (9-6)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°10 (7)

Un productor de gas utiliza carbón de la siguiente composición:

C	76%
H	3
O	6
H ₂ O	3
R	12

Es alimentado con una mezcla de aire y vapor.
El gas producido tiene la siguiente composición:

CO	24%	H ₂	14%
CH ₄	3	N ₂	48
C ₂ H ₄	1	H ₂ O	6
CO ₂	4		

1/3 de las cenizas del productor de gas, son carbono que no reaccionó.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido, por kilogramo de carbón.
2. Los metros cúbicos de aire suministrados, por kilogramo de carbón.
3. Los kilogramos de vapor alimentado, por metro cúbico de aire.
4. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbon que está disponible en el gas.

SOLUCION

1.

Vamos a utilizar la ecuación (2)

$$\text{Cenizas (3/3)} = R (2/3) + U.C (1/3)$$

$$U.C = 0,12[(1/3) \div (2/6)] = 0,06 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,76 - 0,06 = 0,70 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C que hay en 1 m³ de gas:

$$\text{En CO} = 1 \times 0,24 = 0,24$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,03 = 0,03$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,01 = 0,02$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,04 = 0,04$$

$$\underline{0,33}$$

$$C \text{ en gas} = 0,33 \cdot (12/22,4) = 0,177 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 0,70/0,177 = 3,95 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido} = 3,95 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (10-1)}$$

2.

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 3,95 \times 0,48 = 1,896 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1,896/0,79 = 2,40 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire suministrado} = 2,40 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (10-2)}$$

3.

H en vapor = H en gas - H en carbon:

Cálculo del H en gas:

$$\text{En CH}_4 = 2 \times 0,03 = 0,06$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,01 = 0,02$$

$$\text{En H}_2 \text{ libre} = 1 \times 0,14 = 0,14$$

$$\text{En H}_2\text{O} = 1 \times 0,06 = 0,06$$

$$\underline{0,28}$$

$$\text{Total H en gas} = 0,28 \times 3,95 \cdot (2/22,4) = 0,099 \text{ Kg.}$$

$$\text{H en carbon} = 0,03 + 0,03 \cdot (2/18) = 0,0333 \text{ Kg}$$

$$\text{H del vapor} = 0,099 - 0,0333 = 0,0657 \text{ Kg}$$

$$\text{Vapor} = 0,0657 \cdot (18/2) = 0,5913 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor} = 0,5913/2,40 = 0,245 \text{ Kg./m}^3 \text{ de aire}$$

$$\text{Vapor} = 0,245 \text{ Kg./m}^3 \text{ de aire (10-3)}$$

4.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

$$P.C.B = 8100C + 34000 (H - O/8) + 2200S - 586 (9H + W)$$

$$P.C.B = 8100 \times 0,76 + 34000 (0,03 - 0,06/8) + 0 - 586 (9 \times 0,03 + 0,03) = 6745 \text{ Kcal.}$$

Potencia calorífica del gas:

$$\text{CH}_4 = 0,03 \times 8560 = 257 \text{ Kcal.}$$

$$\text{CO} = 0,24 \times 3034 = 728 \text{ Kcal.}$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,01 \times 14480 = 145 \text{ Kcal.}$$

$$\text{H}_2 = 0,14 \times 2582 = 362 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 1492 \text{ Kcal. m}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 3,95 \cdot (1492/6745) = 0,874 \text{ de la del carbon}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 87,4\% \text{ de la del carbon (10-4)}$$

EJERCICIO N°11 (7)

Un carbon de la siguiente composicion, es utilizado en un productor de gas

C	77,7%	N	1,9%
H	5,4	O	8,7
H ₂ O	1,8	R	4,5

Las cenizas del productor de gas tienen 25% de carbono sin quemar
El gas producido tiene la siguiente composicion:

CO	22,7%	CO ₂	5,2%
H ₂	9,6	N ₂	57,4
CH ₄	2,4	H ₂ O	1,9
C ₂ H ₄	0,8		

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por libra de carbón.
2. Los pies cúbicos de aire utilizado, por libra de carbón.
3. Las libras de vapor utilizado, por libra de carbón.
4. El porcentaje de la potencia calorifica original del carbon que está disponible en el

gas

SOLUCION

1.

Vamos a utilizar la ecuación (2)

$$\text{Cenizas (100\%)} = R (75\%) + U.C (25\%)$$

$$U.C = 0,045 \cdot (25/75) = 0,015 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,777 - 0,015 = 0,762 \text{ Lbs.}$$

Cálculo del C que hay el 1 ft³ de gas:

$$\text{En CO} = 1 \times 0,227 = 0,227$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,024 = 0,024$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,008 = 0,016$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,052 = 0,052$$

$$\Sigma = 0,319$$

$$C \text{ en gas} = 0,319 \cdot (12/359) = 0,0106 \text{ lbs./ft}^3$$

$$\text{Gas} = 0,762 / 0,0106 = 71,9 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas producido} = 71,9 \text{ ft}^3/\text{lb. de carbón (11-1)}$$

2

$$N_2, \text{ aire} = N_2, \text{ gas} - N_2, \text{ carbon:}$$

$$N_2, \text{ gas} = 71,9 \times 0,574 = 41,27 \text{ ft}^3$$

$$N_2, \text{ carbón} = 0,019 \cdot (359/28) = 0,243 \text{ ft}^3$$

$$N_2, \text{ aire} = 41,27 - 0,243 = 41,027 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 41,027 / 0,79 = 51,93 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire utilizado} = 51,93 \text{ ft}^3/\text{lb. de carbón. (11-2)}$$

3.

$$H, \text{ vapor} = H, \text{ gas} - H, \text{ carbón:}$$

Calculo del H en gas:

$$H_2 \text{ libre} = 1 \times 0,096 = 0,096$$

$$CH_4 = 2 \times 0,024 = 0,048$$

$$C_2H_4 = 2 \times 0,008 = 0,016$$

$$H_2O = 1 \times 0,019 = 0,019$$

$$\Sigma = 0,179$$

$$H \text{ en gas} = 0,179 \times 71,9 \cdot (2/359) = 0,0717 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ en carbón} = 0,054 + 0,018 \cdot (2/18) = 0,0561 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ en vapor} = 0,0717 - 0,056 = 0,0157 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor} = 0,0157 \cdot (18/2) = 0,1413 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor} = 0,1413 \text{ lbs/lb. de carbón (11-3)}$$

4

Calculo de la potencia calorifica del carbon:

$$P.C.B = 14600C + 61000 \cdot (H - O/8) + 4000S - 1050 \cdot (9H + W)$$

$$P.C.B = 14600 \times 0,777 + 61000 \cdot (0,054 - 0,087/8) + 0 - 1050 \cdot (9 \times 0,054 + 0,018) \\ = 13446 \text{ BTU/lb.}$$

Potencia calorifica del gas:

$$CO = 0,227 \times 341 = 77 \text{ BTU}$$

$$H_2 = 0,096 \times 290 = 28 \text{ BTU}$$

$$CH_4 = 0,024 \times 962 = 23 \text{ BTU}$$

$$C_2H_4 = 0,008 \times 1627 = 13 \text{ BTU}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 141 \text{ BTU/ft}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 71,9 \cdot (141/13446) = 0,754 \text{ de la del carbon.}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 75,4\% \text{ de la del gas. (11-4)}$$

EJERCICIO N°12 (7)

Los siguientes datos fueron obtenidos en la operacion de un productor de gas

CARBON		GAS	
C	75,0%	CO	26,0%
H	4,0	CO ₂	3,0
O	6,0	CH ₄	2,0
H ₂ O	5,0	N ₂	50,0
R	9,0	H ₂	15,0
N	1,0	H ₂ O	4,0

Las cenizas analizaron 25% de carbono.

PREGUNTAS

1. Los metros cubicos de gas producido, por kilogramo de carbón.
2. Los metros cubicos de aire utilizado.
3. Los kilogramos de vapor suministrados al productor.
4. El porcentaje del vapor total suministrado que es descompuesto en el productor

SOLUCION

1

Utilizamos la ecuación (2).

$$\text{Cenizas (100\%)} = R (75\%) + U.C (25\%)$$

$$U.C = 0,09 \cdot (25/75) = 0,03 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,75 - 0,03 = 0,72 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C que hay en 1 m³ de gas:

$$\text{En CO} = 1 \times 0,26 = 0,26$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,03 = 0,03$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,02 = 0,02$$

$$\Sigma = 0,31$$

$$\text{C en gas} = 0,31 \cdot (12/22,4) = 0,166 \text{ Kg/m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 0,72/0,166 = 4,33 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido} = 4,33 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (12-1)}$$

2

N₂ del aire = N₂ en gas - N₂ en carbón:

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 4,33 \times 0,5 = 2,165 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ en carbón} = 0,01 \cdot (22,4/28) = 0,008 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ del aire} = 2,165 - 0,008 = 2,157 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 2,157/0,79 = 2,73 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire utilizado} = 2,73 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (12-2)}$$

3

H del vapor = H en gas - H del carbón

Cálculo del H en el gas:

$$\text{CH}_4 = 2 \times 0,02 = 0,04 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 \text{ libre} = 1 \times 0,15 = 0,15 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1 \times 0,04 = 0,04 \text{ m}^3$$

$$\Sigma = 0,23 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Total H}_2 = 0,23 \times 4,33 = 0,9959 \text{ m}^3$$

$$\text{Total H en gas} = 0,9959 \cdot (2/22,4) = 0,0890 \text{ Kg.}$$

$$\text{H del carbón} = 0,04 + 0,05 \cdot (2/18) = 0,0456 \text{ Kg.}$$

$$\text{H del vapor} = 0,0890 - 0,0456 = 0,0434 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,0434 \cdot (18/2) = 0,391 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor suministrado} = 0,391 \text{ Kg./Kg. de carbon (12-3)}$$

4

$$\text{H}_2\text{O en gas} = 0,04 \times 4,33 \cdot (18/22,4) = 0,14 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O no descompuesta} = 0,14 - 0,05 = 0,09 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O descompuesta en quemar C} = 0,391 - 0,09 = 0,301 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2\text{O descompuesta} = 0,301/0,391 = 0,77 \text{ del vapor suministrado}$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 77,0\% \text{ del suministrado (12-4)}$$

EJERCICIO N°13 (7)

Un carbón fue analizado como sigue:

C	84,0%	O	8,0%
H	4,0	R	4,0

Cuando este carbon fue utilizado en un productor de gas, produjo un gas cuyo analisis fue el siguiente:

CO ₂	8,0%	H ₂	12,0%
CO	20,0	N ₂	54,0
CH ₄	2,0	H ₂ O	4,0

Las cenizas totalizaron el 7% del peso del carbon. Asumir que todo el vapor utilizado se descompuso

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por libra de carbon.
2. Los pies cúbicos de aire utilizado, por libra de carbon.
3. Las libras de vapor utilizado, por libra de carbon.
4. El calor absorbido en el productor de gas por el vapor, por libra de carbon

SOLUCION

1.

Utilizamos la ecuación (2):

$$\text{Cenizas} = R + U.C$$

$$U.C = 0,07 - 0,04 = 0,03 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,84 - 0,03 = 0,81 \text{ lbs.}$$

Cálculo del C en 1 ft³ de gas:

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,08 = 0,08$$

$$\text{En CO} = 1 \times 0,20 = 0,20$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,02 = 0,02$$

$$\Sigma = 0,30$$

$$C \text{ en gas} = 0,30 \cdot (12/359) = 0,01003 \text{ lbs/ft}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 0,81/0,01003 = 80,8 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas producido} = 80,8 \text{ ft}^3/\text{lb. de carbon (13-1)}$$

2.

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 80,8 \times 0,54 = 43,632 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 43,632/0,79 = 55,2 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire utilizado} = 55,2 \text{ ft}^3/\text{lb. de carbon. (13-2)}$$

3.

$$H \text{ del vapor} = H \text{ en el gas} - H \text{ del carbon} - H \text{ del H}_2\text{O del gas.}$$

$$H \text{ del carbon} = 0,04 \text{ lbs}$$

H en el gas.

$$\text{CH}_4 = 2 \times 0,02 = 0,04$$

$$\text{H}_2 \text{ libre} = 1 \times 0,12 = 0,12$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1 \times 0,04 = 0,04$$

$$\Sigma = 0,20$$

$$H \text{ del gas} = 0,20 \times 80,8 \cdot (2/359) = 0,09003 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ del H}_2\text{O} = 0,04 \times 80,8 \cdot (2/359) = 0,018 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ del vapor} = 0,09003 - 0,04 - 0,018 = 0,03203 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor} = 0,03203 \cdot (18/2) = 0,288 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor utilizado} = 0,288 \text{ lbs/lb. de carbon (13-3)}$$

4

Ver la Tabla XLII del Apéndice, sobre calores de formación de oxidos

$$\text{Calor de formación del H}_2\text{O (g)} = 57801 \text{ lb-cal/mol.}$$

$$\text{Moles de H}_2\text{O} = 0,288/18$$

$$\text{Calor de descomposición} = 57801 \cdot (0,288/18) = 924,8$$

$$\text{Calor de descomposición del H}_2\text{O} = 924,8 \text{ lb-cal (13-4)}$$

EJERCICIO N°14 (7)

El mismo carbon del ejercicio # 8 es utilizado en un productor de gas, produciendo gas de la composición siguiente:

CO	24%	CO ₂	6%
CH ₄	2	H ₂	15
H ₂ O	7	N ₂	46

Las cenizas del productor de gas contienen 15% de carbono.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por libra de carbón.
2. La potencia calorífica del carbón, por libra.
3. La potencia calorífica del coque del ejercicio # 8, por libra
4. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que se encuentra disponible en el coque.
5. Compare la potencia calorífica del gas del horno para coque, con la del horno productor de gas, cada uno por pie cúbico.
6. Compare el valor total del calor disponible en el horno para coque con el del productor de gas, cada uno expresado en porcentaje de la potencia calorífica del carbón a partir del cual fue producido.

SOLUCION

1.

Aplicamos la ecuación (2):

$$\text{Cenizas (100\%)} = R (85\%) + U.C (15\%) \therefore$$

$$U.C = 0,058 \cdot (15/85) = 0,0102 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,766 - 0,0102 = 0,756 \text{ lbs.}$$

Cálculo del peso del C en 1 ft³ de gas:

$$\text{En CO} = 1 \times 0,24 = 0,24$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,06 = 0,06$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,02 = 0,02$$

$$\Sigma = 0,32$$

$$C = 0,32 \cdot (12/359) = 0,0107 \text{ lbs./ft}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 0,756 / 0,0107 = 70,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas} = 70,6 \text{ ft}^3/\text{lb. de carbón (14-1)}$$

2.

$$P.C.B = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S - 1050(9H + W)$$

$$P.C.B = 14600 \times 0,766 + 61000(0,051 - 0,072/8) + 4000 \times 0,028 - 1050(9 \times 0,051 + 0)$$

$$13376 \text{ BTU/lb.}$$

$$P.C.B \text{ del carbón} = 13376 \text{ BTU/lb. (14-2)}$$

3.

$$P.C.B = 14600 \times 0,871 + 61000(0,011 - 0,019/8) + 4000 \times 0,01 - 1050(0,011 + 0)$$

$$= 13179 \text{ BTU/lb.}$$

$$P.C.B \text{ del coque} = 13179 \text{ BTU/lb (14-3)}$$

4.

Coque producido con 2000 lbs. de carbón = 1415 lbs.

$$P.C.B \text{ del coque} = (14,5 \times 13179) \div (2000 \times 13376) = 0,697 \text{ de la del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del coque} = 69,7\% \text{ de la del carbón (14-4)}$$

5.

Potencia calorífica del gas de horno para coque.

$$C_6H_6 = 0,008 \times 3763 = 30 \text{ BTU}$$

$$C_2H_4 = 0,03 \times 1627 = 49 \text{ BTU}$$

$$CH_4 = 0,34 \times 962 = 327 \text{ BTU}$$

$$CO = 0,09 \times 341 = 31 \text{ BTU}$$

$$H_2 = 0,385 \times 290 = 112 \text{ BTU}$$

$$P.C.B \text{ gas de coque} = 549 \text{ BTU/ft}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas de horno para coque} = 549 \text{ BTU/ft}^3 (14-5)$$

Potencia calorífica del gas del productor de gas.

$$CO = 0,24 \times 341 = 82 \text{ BTU}$$

$$CH_4 = 0,02 \times 962 = 19 \text{ BTU}$$

$$H_2 = 0,15 \times 290 = 44 \text{ BTU}$$

$$P.C.B \text{ del gas del productor} = 145 \text{ BTU/ft}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas del productor de gas} = 145 \text{ BTU/ft}^3 (14-5)$$

La potencia calorífica del gas de horno para coque es mayor que la del productor de gas, por pie cúbico, pero en el productor de gas se produce un volumen mayor de gas

6

$$P.C.B \text{ del gas del productor} = 70,6 \cdot (145/13376) = 0,764 \text{ de l del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del gas del productor} = 76,4\% \text{ de la del carbón (14-6)}$$

En el horno para coque se produjeron 11956 ft³ de gas por 2000 lbs de carbón

$$P.C.B \text{ del gas de coque} = (11956 \times 549) / (2000 \times 3376) = 0,245 \text{ de la del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del gas de horno para coque} = 24,5\% \text{ de la del carbón (14-6)}$$

EJERCICIO N°15 (7)

Un horno open-hearth es calentado con gas producido a partir del siguiente carbon

C	77,0%
H	5,0
O	8,0
H ₂ O	3,0
R	7,0

Inicialmente el gas fue producido en un productor de gas, con la siguiente composición

CO	19,6%	H ₂	12,8%
CO ₂	7,8	N ₂	55,3
CH ₄	2,0	H ₂ O	2,5

Las cenizas del productor de gas contenían 10% de carbono.

Más tarde, el carbon fue destinado en un horno para coque con recuperación de subproductos produciendo gas de la siguiente composición (tal como sale del horno)

H ₂	50,0%	N ₂	1,4%
CH ₄	28,0	CO ₂	2,0
CO	8,0	H ₂ O	6,6
C ₂ H ₄	4,0		

El coque de estos hornos contenía. C. 89%; H₂O, 1%, R, 10%

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque producido, por 1000 kilogramos de carbon.
2. En cada caso los metros cubicos de gas producido, por 1000 kilogramos de carbon.
3. En el productor de gas, los metros cubicos de aire utilizado, por kilogramo de carbon.
4. En cada caso, la potencia calorifica del gas, por metro cubico.
5. En cada caso el porcentaje de la potencia calorifica del carbon que está disponible en el gas.
6. El porcentaje de la potencia calorifica del carbon que está disponible en el coque.
7. Los kilogramos de vapor alimentado al productor, por kilogramo de carbon y el porcentaje de vapor descompuesto en él.

SOLUCION

1.

Peso de R en coque = Peso de R en carbon :

$$\text{Peso de coque} = 1000 \cdot (0,07/0,10) = 700 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso de coque} = 700 \text{ Kg. (15-1)}$$

2.

En ambos casos, utilizamos la ecuación (2).

En el productor de gas:

$$\text{Cenizas} = 1000 \times 0,1 = 100 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en cenizas} = 100 \cdot (0,10 - 0,07) = 30 \text{ Kg.}$$

$$\text{C total en gas} = 1000 \times 0,77 - 30 = 740 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C en 1 m³ de gas:

$$\text{En CO} = 1 \times 0,196 = 0,196$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,078 = 0,078$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,020 = 0,020$$

$$\Sigma = 0,294$$

$$\text{C en gas} = 0,294 \cdot (12/22,4) = 0,1575 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 740/0,1575 = 4700 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido en el productor de gas} = 4700 \text{ m}^3 \text{ (15-2)}$$

En el horno para coque.

$$\text{C en coque} = 700 \times 0,89 = 623 \text{ Kg.}$$

$$\text{C total en gas} = 770 - 623 = 147 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C en 1 m³ de gas:

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,28 = 0,28$$

$$\text{En CO} = 1 \times 0,08 = 0,08$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,04 = 0,08$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,02 = 0,02$$

$$\Sigma = 0,46$$

$$\text{C en gas} = 0,46 \cdot (12/22,4) = 0,246 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{Gas} = 147/0,246 = 597 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido en el horno para coque} = 597 \text{ m}^3 \text{ (15-2)}$$

3.

Por kilogramo de carbon se producen 4,7 m³ de gas.

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 4,7 \times 0,553 = 2,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 2,6/0,79 = 3,29 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire utilizado en productor de gas} = 3,29 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbon (15-3)}$$

4.

Cálculo de la potencia calorifica en el productor de gas:

$$\text{CO} = 0,196 \times 3034 = 595 \text{ Kcal}$$

$$\text{CH}_4 = 0,020 \times 8560 = 171 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 0,128 \times 2582 = 331 \text{ Kcal.}$$

$$\Sigma = 1097 \text{ Kcal}$$

$$\text{P.C.B del gas del productor} = 1097 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (15-4)}$$

Cálculo de la potencia calorífica del gas de horno para coque:

$$\text{H}_2 = 0,50 \times 2582 = 1291 \text{ Kcal}$$

$$\text{CH}_4 = 0,28 \times 8560 = 2397 \text{ Kcal.}$$

$$\text{CO} = 0,08 \times 3034 = 243 \text{ Kcal.}$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,04 \times 14480 = 579 \text{ Kcal.}$$

$$\Sigma = 4510 \text{ Kcal.}$$

$$\text{P.C.B del gas de horno para coque} = 4510 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (15-4)}$$

5.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000 \cdot (\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 586 \cdot (9\text{H} + \text{W})$$

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,77 + 34000 \cdot (0,05 - 0,08/8) + 0 - 586 \cdot (9 \times 0,05 + 0,03) \\ = 7316 \text{ Kcal/Kg. de carbón.}$$

$$\text{P.C.B del gas del productor} = 4,7 (1097/7316) = 0,705 \text{ de la del carbón}$$

$$\text{P.C.B del gas del productor} = 70,5\% \text{ de la del carbón (15-5)}$$

$$\text{P.C.B del gas de horno de coque} = 0,597 (4510/7316) = 0,368 \text{ de la del carbón}$$

$$\text{P.C.B del gas de horno de coque} = 36,8\% \text{ de la del carbón (15-5)}$$

6

$$\text{P.C.B del coque} = 8100 \times 0,89 - 586 \times 0,01 = 7203 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 0,7 (7203/7316) = 0,689 \text{ de la del carbón.}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 68,9\% \text{ de la del carbón (15-6)}$$

7.

Gas del productor de gas = $4,7 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón.}$

H del vapor = H en gas - H en carbón

Cálculo del H en el gas:

$$\text{En CH}_4 = 4,7 \times 0,02 \cdot (4/22,4) = 0,0168 \text{ Kg.}$$

$$\text{En H}_2 \text{ libre} = 4,7 \times 0,128 \cdot (2/22,4) = 0,0537 \text{ Kg.}$$

$$\text{En H}_2\text{O} = 4,7 \times 0,025 \cdot (2/22,4) = 0,0105 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total H en gas} = 0,0810 \text{ Kg.}$$

$$\text{H en carbón} = 0,05 \text{ Kg.}$$

$$\text{H del vapor} = 0,081 - 0,05 = 0,031 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O de este} = 0,031 \cdot (18/2) = 0,279 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2\text{O en carbón} = 0,03 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor alimentado} = 0,279 - 0,03 = 0,249 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor alimentado} = 0,249 \text{ Kg. (15-7)}$$

Cálculo del % de vapor descompuesto

$$\text{H}_2\text{O en gas del productor} = 4,7 \times 0,025 \cdot (18/22,4) = 0,0944 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O procedente del vapor} = (0,0944 - 0,03) \cdot 22,4/18 = 0,0801 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor alimentado} = 0,249 \cdot (22,4/18) = 0,3099 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 0,3099 - 0,0801 = 0,2298 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 0,2298/0,3099 = 0,742$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 74,2\% \text{ (15-7)}$$

EJERCICIO N°16 (7)

Un carbón utilizado en un productor de gas, analizó lo siguiente:

C	79,0%	N	1,7%
H	5,1	H ₂ O	1,8
R	6,0	O	6,4

El gas producido tiene la siguiente composición:

CO ₂	7,0%	H ₂	14,0%
CO	21,0	N ₂	53,0
CH ₄	2,5	H ₂ O	2,5

Las cenizas alcanzan al 9,0% del peso del carbón.
El aire utilizado está 80% saturado con vapor de agua.
Temperatura, 26°C; barómetro, 740 mm.

PREGUNTAS

1. El volumen de gas producido, por kilogramo de carbón.
2. El volumen de aire (humedo) a condiciones normales, utilizado por kilogramo de carbón.
3. El peso del vapor utilizado, por kilogramo de carbón.
4. El porcentaje del agua soplada que fue descompuesta en el productor.
5. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón que esta disponible en el gas.

SOLUCION

Utilizando la ecuación (2):

$$C \text{ en cenizas} = 0,09 - 0,06 = 0,03 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,79 - 0,03 = 0,76 \text{ Kg.}$$

Asumo 1 m³ de gas.

$$C \text{ en gas} = (0,07 + 0,21 + 0,025) \cdot (12/22,4) = 0,1634 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 0,76/0,1634 = 4,651 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas} = 4,651 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón. (16-1)}$$

$$N_2 \text{ en carbón} = 0,017 \cdot (22,4/28) = 0,0136 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ en gas} = 0,53 \times 4,651 = 2,4650 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ para aire seco} = 2,4650 - 0,0136 = 2,4514 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco} = 2,4514/0,79 = 3,103 \text{ m}^3$$

En la Tabla XXIV del Apéndice se puede encontrar la presión máxima de saturación de aire con vapor de agua para diferentes temperaturas:

$$\text{Presión máxima de vapor de agua a } 26^\circ\text{C} = 25,2 \text{ mm.}$$

$$\text{Presión real del agua} = 25,2 \times 0,8 = 20,16 \text{ mm.}$$

$$\text{Presión de aire seco} = 740 - 20,16 = 719,84 \text{ mm}$$

$$\text{Volumen de agua} = 3,103 \cdot (20,16/719,84) = 0,0860 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 3,103 + 0,087 = 3,19 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 3,19 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (16-2)}$$

$$H \text{ libre en carbón} = 0,051 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ en carbón} = 0,018 \text{ Kg.}$$

$$H \text{ en CH}_4 = 4,651 \times 0,025 \times 2 \cdot (2/22,4) = 0,0208 \text{ Kg.}$$

$$H \text{ libre en gas} = 4,651 \times 0,14 \cdot (2/22,4) = 0,0581 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total H en gas} = 0,0789 \text{ Kg.}$$

$$H \text{ procedente del vapor} = 0,0789 - 0,051 = 0,0279 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ de este} = 0,0279 \cdot (18/2) = 0,2511 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ en gas} = 4,651 \times 0,025 \cdot (18/22,4) = 0,0934 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor} = 0,2511 + 0,0934 - 0,018 = 0,3265 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor de agua utilizado} = 0,3265 \text{ Kg. (16-3)}$$

4

$$\text{H}_2\text{O descompuesta} = 0,2511 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O del soplo} = 0,3265$$

$$\text{H}_2\text{O descompuesta} = 0,2511/0,3265 = 0,769$$

$$\text{H}_2\text{O descompuesta} = 76,9\% \text{ del soplo. (16-4)}$$

5

Cálculo de la potencia calorífica del carbón

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000\cdot(\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 586\cdot(9\text{H} + \text{W})$$

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,79 + 34000 \cdot (0,051 - 0,064/8) + 0 - 586 \cdot (9 \times 0,051 + 0,018)$$

$$= 7581,5 \text{ Kcal/Kg.}$$

Cálculo de la potencia calorífica del gas.

$$\text{CO} = 4,651 \times 0,21 \times 3034 = 2963,3 \text{ Kcal}$$

$$\text{CH}_4 = 4,651 \times 0,025 \times 8560 = 995,3 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 4,651 \times 0,14 \times 2582 = 1681,2 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 5639,8 \text{ Kcal}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 5639,8/7581,5 = 0,744 \text{ de la del carbón}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 74,4\% \text{ de la del carbón (16-5)}$$

EJERCICIO N°17 (7)

Un productor de gas utiliza un carbón cuyo análisis (seco), es.

C	75,68%	O	12,70%
H	4,50	R	7,12

Tal y como se utiliza, el carbón lleva una humedad igual al 3,4% del carbon seco. Las cenizas del productor contienen 21,07% de carbono sin quemar.

El análisis (seco) del gas producido, es

CO	5,7%	H ₂	10,5%
CO ₂	22,0	O ₂	0,4
CH ₄	2,6	N ₂	58,2
C ₂ H ₄	0,6		

En adición, el gas lleva 30,4 gramos de humedad por cada metro cúbico de gas seco.

Ambos, aire y vapor, son suministrados al productor por un soprador. En adición al vapor, el aire lleva 15 gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire seco, debido a la humedad.

PREGUNTAS

1. El volumen de gas seco producido, por kilogramo de carbon.
2. El peso y volumen de aire suministrado, por kilogramo de carbon seco, medido en aire en sus condiciones húmedas y a 20°C.
3. El peso del vapor suministrado, por kilogramo de carbon seco.
4. El porcentaje del vapor suministrado que no es descompuesto en el productor.

SOLUCION

1

$$\text{Cenizas (100\%)} = \text{R (78,93\%)} + \text{U.C (21,07\%)}$$

$$\text{U.C} = 0,0712 \cdot (21,07/78,93) = 0,0191 \text{ Kg.}$$

$$\text{C total en gas} = 0,7568 - 0,0191 = 0,7377 \text{ Kg}$$

Cálculo del C que hay en 1 m³ de gas:

$$\text{En CO} = 1 \times 0,057 = 0,057$$

$$\text{En CO}_2 = 1 \times 0,220 = 0,220$$

$$\text{En CH}_4 = 1 \times 0,026 = 0,026$$

$$\text{En C}_2\text{H}_4 = 2 \times 0,006 = 0,012$$

$$\Sigma = 0,315$$

$$\text{C en gas} = 0,315 \cdot (12/22,4) = 0,169 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 0,7377/0,169 = 4,37 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas seco producido} = 4,37 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón. (17-1)}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 0,582 \times 4,37 = 2,543 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire seco a C N} = 2,543/0,79 = 3,22 \text{ m}^3$$

Cambio de condiciones.

$$T_1 = 273\text{K} \quad T_2 = 293\text{K}$$

$$V_1 = 3,22 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = 3,22 \cdot (293/273) = 3,44 \text{ m}^3 \text{ de aire seco a C.D.}$$

$$\text{Humedad del aire C N} = 3,22 [(15/1000) \cdot (22,4/18)] = 0,0601 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo C.N} = 3,22 + 0,0601 = 3,28 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D} = 3,28 \cdot (293/273) = 3,53 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire húmedo a C.D} = 3,53 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (17-2)}$$

$$\text{Densidad del aire} = 1,293 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{Humedad del aire} = 3,22 \times 15/1000 = 0,0483 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del aire C.N} = 1,293 \times 3,22 = 4,16 \text{ kg.}$$

$$\text{Peso del aire húmedo} = 4,16 + 0,0483 = 4,21 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del aire húmedo} = 4,21 \text{ Kg./Kg. de carbón (17-2)}$$

3

$$\text{H del carbón} = 0,045 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2 \text{ en gas} = (2 \times 0,026 + 2 \times 0,06 + 1 \times 0,105) \times 4,37 = 0,739 \text{ m}^3$$

$$\text{H en gas} = 0,739 \cdot (2/22,4) = 0,0659 \text{ Kg.}$$

$$\text{H en humedad del aire} = 0,0483 \cdot (2/18) = 0,006 \text{ Kg.}$$

$$\text{H del vapor} = 0,0659 + 0,006 - 0,045 = 0,0269 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O de este} = 0,0269 \cdot (18/2) = 0,242 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor de agua suministrado} = 0,242 \text{ Kg./Kg. de carbón (17-3)}$$

4

$$\text{Vapor no descompuesto} = \text{H}_2\text{O en gas} - \text{Humedad del carbón}$$

$$\text{H}_2\text{O en gas} = 4,37 \times 30,4/1000 = 0,133 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O del carbón} = 0,034 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor no descompuesto} = 0,133 - 0,034 = 0,099 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor no descompuesto} = 0,099/0,242 = 0,409$$

$$\text{Vapor no descompuesto} = 40,9\% \text{ (17-4)}$$

EJERCICIO N°18 (7)

La composición del carbón utilizado y el gas producido en un productor de gas, se dan a continuación

CARBON		GAS (seco)	
C	76,2%	CO ₂	5,9%
H	5,0	CO	22,6
O	10,6	CH ₄	2,7
N	1,4	C ₂ H ₄	0,4
H ₂ O	1,1	H ₂	12,6
R	5,7	N ₂	55,8

Las cenizas producidas contenían 15,1% de carbono sin quemar.

Del gas fueron removidos 13 granos de vapor de agua, por pie cúbico de aire seco. El aire utilizado llevó 2,2% de vapor de agua.

PREGUNTAS

1. El análisis del gas húmedo
2. Los pies cúbicos de gas húmedo producido, por libra de carbón.
3. Los pies cúbicos de aire húmedo utilizado.
4. Las libras de vapor utilizado.
5. El porcentaje del vapor inyectado que fue descompuesto en el productor, asumiendo que la humedad del aire se descompuso en el mismo porcentaje que el vapor

SOLUCION

1

$$\text{Cenizas (100\%)} = R (84,9\%) + U.C (15,1\%) \therefore$$

$$U.C = 0,057 \cdot (15,1/84,9) = 0,01014 \text{ lbs}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,762 - 0,010 = 0,752 \text{ lbs}$$

$$C \text{ en gas} = (1 \times 0,059 + 1 \times 0,226 + 1 \times 0,027 + 2 \times 0,004) (2/359) = 0,0107 \text{ lbs ft}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas seco} = 0,752/0,0107 = 70,28 \text{ ft}^3$$

$$\text{Humedad del gas} = 70,28 \times 13 = 913,64 \text{ granos}$$

$$1 \text{ grano} = 0,000143 \text{ lbs.}$$

$$\text{Humedad} = 913,64 \times 0,000143 = 0,131 \text{ lbs.}$$

$$\text{Humedad} = 0,131 \cdot (359/18) = 2,61 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total gas húmedo} = 70,28 + 2,61 = 72,89 \text{ ft}^3$$

Análisis del gas húmedo (18-1)

$$C(O) = 70,28 \times 0,059/72,89 = 5,7\%$$

$$CO = 70,28 \times 0,226/72,89 = 21,8\%$$

$$CH_4 = 70,28 \times 0,027/72,89 = 2,6\%$$

$$C_2H_6 = 70,28 \times 0,004/72,89 = 0,4\%$$

$$H_2 = 70,28 \times 0,126/72,89 = 12,1\%$$

$$N = 70,28 \times 0,558/72,89 = 53,8\%$$

$$H_2O = 2,61/72,89 = 3,6\%$$

2

$$\text{Total gas húmedo} = 72,89 \text{ ft}^3 (18-2)$$

3

$$N_2 \text{ en carbón} = 0,014 \cdot (359/28) = 0,18 \text{ ft}^3$$

$$N_2 \text{ en gas seco} = 0,558 \times 70,28 = 39,17 \text{ ft}^3$$

$$N_2 \text{ para aire} = 39,17 - 0,18 = 38,99 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire seco} = 38,99/0,79 = 49,35 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 49,35/0,978 = 50,4 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 50,4 \text{ ft}^3 (18-3)$$

4

$$H_2 \text{ del carbón} = 0,05 + 0,011 \cdot (2/18) = 0,05122 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ en gas seco} = 70,28 \cdot (2 \times 0,027 + 2 \times 0,004 + 1 \times 0,126) (2/359) = 0,074 \text{ lbs}$$

$$H \text{ del agua del gas} = 0,131 \cdot (2/18) = 0,0145 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total H del gas} = 0,074 + 0,0145 = 0,0885 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor de agua en aire} = (50,4 - 49,35) = 1,05 \text{ ft}^3$$

$$H \text{ de este} = 1,05 (18/359) (2/18) = 0,00585 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ del } H_2O \text{ del carbón} = 0,011 (2/18) = 0,00122 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ del vapor} = 0,0885 - 0,0512 - 0,00585 = 0,03145 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor de agua} = 0,03145 (18/2) = 0,283 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor de agua utilizado} = 0,283 \text{ lbs. (18-4)}$$

5

$$H \text{ en gas humedo} = 72,28 (2 \times 0,026 + 2 \times 0,004 + 1 \times 0,121) (2/359) = 0,0735 \text{ b}$$

$$H_2O \text{ de este (descompuesta)} = 0,0735 (18/2) = 0,6615 \text{ lbs.}$$

$$H \text{ del carbon} = 0,05 \text{ lbs.}$$

$$H_2O \text{ de este} = 0,05 (18/2) = 0,45 \text{ lbs.}$$

$$H_2O \text{ en aire} = 0,00585 (18/2) = 0,05265 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total vapor inyectado} = 0,275 + 0,05265 = 0,32765 \text{ lbs.}$$

$$H_2O \text{ del vapor descompuesta} = 0,6615 - 0,45 = 0,2115 \text{ lbs.}$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 0,2115 / 0,32765 = 0,645$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 64,5\% \text{ del inyectado (18-5)}$$

EJERCICIO N°19 (7)

El carbon siguiente es utilizado en un productor aire-gas, produciendo 4 metros cúbicos de un gas de la composición dada abajo, por kilogramo de carbon.:

CARBON		GAS	
C	75,0%	CO	27,0%
H	3,6	CO ₂	3,0
O	6,4	CH ₄	2,0
H ₂ O	6,0	H ₂	6,0
R	9,0	N ₂	62,0

Los gases dejan el productor a 750°C

PREGUNTAS

- El porcentaje de la potencia calorífica del carbón en:
 - Carbono no combustible en las cenizas
 - La potencia calorífica del gas.
 - El calor sensible en el gas
 - El calor perdido por radiación y conducción.
- Si el vapor es utilizado para reducir las pérdidas de calor, ¿cuanto vapor sería requerido para reducir el calor perdido en los gases en 1%, y las pérdidas por radiación y conducción en 13%?
- Asumiendo que todas las demás reacciones continúan iguales, cuál sería la composición del nuevo gas?
- ¿Qué porcentaje de la potencia calorífica original del carbón estará presente en el nuevo gas?

SOLUCION

i

a

Potencia calorífica del carbón:

$$P.C.B = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W)$$

$$P.C.B = 8100 \times 0,75 + 34000(0,036 - 0,064/8) + 0 - 586(9 \times 0,036 + 0,06) = 6802 \text{ kcal/kg}$$

Cálculo del C que no reacciona.

$$C \text{ en gas} = 4 - (1 \times 0,27 + 1 \times 0,03 + 1 \times 0,02) (12/22,4) = 0,686 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ que no reacciona} = 0,75 - 0,686 = 0,064 \text{ Kg.}$$

$$P.C.B \text{ de este} = 8100 \times 0,064 = 518,4 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B \text{ del C que no reacciona} = 518,4/6802 = 0,0762$$

$$P.C.B \text{ del C que no reacciona} = 7,62\% \text{ de la del carbón (19-1.a)}$$

b.

Cálculo de la potencia calorífica del gas.

$$P.C.B \text{ del gas} = 4 \cdot (0,27 \times 3034 + 0,02 \times 8560 + 0,06 \times 2582) = 4581,2 \text{ Kcal.}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 4581,2/6802 = 0,673 \text{ de la del carbón.}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 67,3\% \text{ de la del carbón (19-1 b)}$$

c

Con la ayuda de la Tabla XV del Apendice, calculamos el calor sensible del gas a 750°C

Calor sensible = Volumen x Calor específico x Temperatura;

$$CO + N_2 = 4 \times 0,89 \cdot (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 750) \times 750 = 850,4 \text{ Kcal}$$

$$CO_2 = 4 \times 0,03 \cdot (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 750) \times 750 = 42,6 \text{ Kcal.}$$

$$CH_4 = 4 \times 0,02 \cdot (0,380 + 21 \times 10^{-5} \times 750) \times 750 = 32,3 \text{ Kcal.}$$

$$H_2 = 4 \times 0,06 \cdot (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 750) \times 750 = 56,9 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor sensible en gas} = 982,2 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor sensible en gas} = 982,2/6802 = 0,144 \text{ del calor del carbón.}$$

$$\text{Calor sensible en gas} = 14,4\% \text{ de la P.C.B del carbón (19-1.c)}$$

d

$$\text{Pérdidas de calor} = 6802 - 518,4 - 4581,2 - 982,2 = 720,2 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Pérdidas de calor} = 720,2/6802 = 0,106 \text{ de la P.C.B del carbón.}$$

$$\text{Pérdidas de calor} = 10,6\% \text{ (19-1 d)}$$

2.

El calor que se ha de perder, puede ser utilizado en descomponer agua y aumentar así la potencia calorífica del gas, por la producción de más gases combustibles, de acuerdo a la siguiente reacción



De acuerdo a la Tabla XLII del Apendice

Calor de formación de $H_2O (g)$ = 57801 Kcal/mol

$$\text{Pérdidas reducidas} = 982,2 \cdot (1/4) + 720,2 \cdot (1/3) = 485,6 \text{ Kcal}$$

$$H_2O = 485,6 \text{ Kcal} + (57801 \text{ Kcal./mol}) = 0,0084 \text{ moles.}$$

de moles = Peso/Peso molecular

$$\text{Peso } H_2O = 0,0084 \times 18 = 0,151 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ utilizada para reducir pérdidas} = 0,151 \text{ Kg. (19-2)}$$

3

Distribución del C

La reacción anterior del vapor de agua, necesita:

$$C = 0,151 \cdot (12/18) = 0,101 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ de esta reacción} = 0,151 \cdot (16/18) \cdot (22,4/32) = 0,094 \text{ m}^3$$

$$\text{Este supone } N_2 = 0,094 \cdot (79/21) = 0,354 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ del nuevo gas} = 4 \times 0,62 - 0,354 = 2,126 \text{ m}^3$$

$$CO \text{ producido} = H_2 = 0,151 \cdot (22,4/18) = 0,188 \text{ m}^3$$

$$C \text{ para } CO + CO_2 + CH_4 = 0,686 - 0,101 = 0,585 \text{ Kg.}$$

Relación de C en el gas.

$$\text{En } CO = 4 \times 0,27 \cdot (12/22,4) = 0,5786 \text{ Kg.}$$

$$\text{En } CO_2 = 4 \times 0,03 \cdot (12/22,4) = 0,0643 \text{ Kg.}$$

$$\text{En } CH_4 = 4 \times 0,02 \cdot (12/22,4) = 0,0429 \text{ Kg.}$$

$$\Sigma = 0,6858 \text{ Kg.}$$

PREGUNTAS

1. Por kilogramo de carbón total utilizado, los metros cúbicos de (a) gas de aire y (b) gas de agua producidos.
2. La potencia calorífica de cada uno de los gases, por kilogramo de carbono total, y el porcentaje de la potencia calorífica del carbono, encontrada en el volumen total de cada uno.
3. Los kilogramos de vapor alimentado durante el ciclo vapor, por kilogramo de carbón total quemado durante ambos ciclos.
4. El porcentaje del vapor alimentado que es descompuesto en el productor
5.
 - a. El calor generado por la combustión del carbono a CO y a CO₂, durante el ciclo aire
 - b. El exceso de calor absorbido por la descomposición del vapor sobre el generado por la combustión del carbono durante el ciclo vapor, cada uno expresados por kilogramo de carbón total quemado durante ambos ciclos.

SOLUCION

1.

a. Gas de aire.

$$C \text{ total para gas de aire} = 0,64 \times 0,28 = 0,1792 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C en 1 m³ de gas:

$$C = (1 \times 0,097 + 1 \times 0,331 + 1 \times 0,015) \times (12/22,4) = 0,237 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas de aire} = 0,1792/0,237 = 0,756 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas de aire} = 0,756 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón total (20-1.a)}$$

b. Gas de agua.

$$C \text{ total para gas de agua} = 0,64 \times 0,72 = 0,4608 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C en 1 m³ de gas:

$$C = (1 \times 0,365 + 1 \times 0,010 + 1 \times 0,027) \times (12/22,4) = 0,2154 \text{ Kg.}$$

$$\text{Gas de agua} = 0,4608/0,2154 = 2,139 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas de agua} = 2,139 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón total (20-1.b)}$$

2.

Cálculo de las potencias caloríficas por kilogramo de carbono total

Gas de aire:

$$P.C.B = 0,097 \times 3034 + 0,015 \times 8560 + 0,166 \times 2582 = 851 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B., \text{ gas de aire} = 851 \times 0,756 = 643 \text{ Kcal.}$$

$$P.C.B., \text{ gas de aire} = 643 \text{ Kcal (20-2)}$$

Gas de agua.

$$P.C.B = 0,365 \times 3034 + 0,027 \times 8560 + 0,47 \times 2582 = 2552 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B \text{ del gas de agua} = 2552 \times 2,138 = 5456 \text{ Kcal.}$$

$$P.C.B., \text{ gas de agua} = 5456 \text{ Kcal (20-2)}$$

Cálculo de la potencia calorífica del carbono:

$$P.C.B = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W)$$

$$P.C.B = 8100 \times 0,64 + 34000(0,047 - 0,109/8) + 0 - 586(9 \times 0,047 + 0,086) = 6021 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$P.C.B \text{ del gas de aire} = 643/6021 = 0,107$$

$$P.C.B., \text{ gas de aire} = 10,7\% \text{ de la del carbón (20-2)}$$

$$P.C.B \text{ del gas de agua} = 5456/6021 = 0,907$$

P.C.B, gas de agua = 90,7% de la del carbón (20.2)

3

$$\begin{aligned} \text{H del carbón} &= 0,047 \times 0,72 = 0,03384 \text{ Kg.} \\ \text{H}_2\text{O del carbón} &= 0,086 \times 0,72 = 0,06192 \text{ Kg.} \\ \text{H de esta} &= 0,06192 \cdot (2/18) = 0,00686 \text{ Kg.} \\ \text{H total del carbón} &= 0,03384 + 0,00686 = 0,0407 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Cálculo del H_2 en gas de agua.

$$\begin{aligned} \text{H}_2 &= 2,138 \cdot (2 \times 0,027 + 1 \times 0,47 + 1 \times 0,128) = 1,3940 \text{ m}^3 \\ \text{H en este} &= 1,394 \cdot (2/22,4) = 0,1246 \text{ Kg.} \\ \text{H vapor} &= 0,1249 - 0,0407 = 0,0839 \text{ Kg.} \\ \text{Vapor} &= 0,0839 \cdot (18/2) = 0,755 \text{ Kg.} \\ \text{Vapor alimentado, ciclo vapor} &= 0,755 \text{ Kg. (20-3)} \end{aligned}$$

4

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O del gas de agua} &= 0,128 \times 2,138 \cdot (18/22,4) = 0,22 \text{ Kg.} \\ \text{H}_2\text{O del carbón} &= 0,086 \times 0,72 = 0,062 \text{ Kg.} \\ \text{Vapor no descompuesto} &= 0,22 - 0,062 = 0,158 \text{ Kg.} \\ \text{Vapor descompuesto} &= 0,755 - 0,158 = 0,597 \text{ Kg.} \\ \text{Vapor descompuesto} &= 0,597/0,755 = 0,791 \\ \text{Vapor descompuesto} &= 79,1\% \text{ del alimentado (20-4)} \end{aligned}$$

5

a. Calor generado por combustión, ciclo aire:

$$\begin{aligned} \text{CO} &= 0,097 \times 0,756 = 0,0733 \text{ m}^3 \\ \text{CO}_2 &= 0,331 \times 0,756 = 0,250 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cuando $\text{C} \rightarrow \text{CO}$, se generan 2430 Kcal./Kg. de C.
Cuando $\text{C} \rightarrow \text{CO}_2$, se generan 8100 Kcal./Kg. de C.

Calor generado cuando:

$$\begin{aligned} \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 0,0733 \cdot (12/22,4) \times 2430 = 95 \text{ Kcal.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 0,25 \cdot (12/22,4) \times 8100 = 1090 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor total generado} &= 95 + 1090 = 1185 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor generado, ciclo aire} &= 1185 \text{ Kcal. (20-5.a)} \end{aligned}$$

b. Ciclo vapor.

$$\begin{aligned} \text{Calor de formación del H}_2\text{O (g)} &= 57801 \text{ Kcal./mol} \\ \text{Calor utilizado en descomponer el vapor} &= 57801 \cdot (0,597/18) = 1917 \text{ Kcal.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 0,365 \times 2,138 \cdot (12/22,4) = 0,418 \text{ Kg.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 0,01 \times 2,138 \cdot (12/22,4) = 0,0115 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Calores de combustión.

$$\begin{aligned} \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 0,418 \times 2430 = 1016 \text{ Kcal.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 0,0115 \times 8100 = 93 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor de combustión} &= 1109 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor de exceso} &= 1917 - 1109 = 808 \text{ Kcal.} \\ \text{Calor exceso para descomponer vapor} &= 808 \text{ kcal (20-5.b)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°21 (7)

Un productor de gas de agua utiliza coque como combustible, conteniendo 90% de carbono fijo y 10% de residuo.

Cuando estaba en la etapa de vapor, la temperatura de la cama del combustible promedio 1000°C., y el gas producido contenía (seco):

H ₂	50,7%
CO	48,0
CO ₂	1,3

Los ensayos demostraron que el 94% del vapor utilizado habia sido descompuesto.

Cuando estaba en la etapa de aire (seco), el gas producido fue 21%CO₂ y 79%N₂

Se produjeron 2,40 metros cúbicos de gas de agua real (humedo), por kilogramo de coque cargado.

La temperatura del gas de agua caliente y de los productos de combustión calientes al dejar la cama de coque fue de 1000°C.

PREGUNTAS

1. ¿Que porcentaje de coque fue quemado por vapor, y por aire? (realizar el calculo sobre la base de un kilogramo de coque utilizado)

2. ¿Que porcentaje de la potencia calorifica del coque, está representado por la potencia calorifica del gas de agua formado?

3. ¿Que proporción de la potencia calorifica del coque es sacada como calor sensible en los gases en cada período (de vapor y de aire)?

SOLUCION

1.

C en coque = 0,9 Kg.

En gas de agua:

H₂ en 1 m³ de gas seco = 0,507 m³

Vapor de H₂O descompuesto = 0,507 m³ = 94% del total

Vapor de agua inyectado, m³ de gas humedo = 0,507 0,94 = 0,540 m³

H₂O en 1 m³ de gas humedo = 0,540 - 0,507 = 0,033 m³

Gas humedo = 1 + 0,033 = 1,033 m³/m³ de gas seco.

1 m³ de gas seco, equivale a 1,033 m³ de gas humedo, entonces, 2,40 m³ de gas humedo equivalen a 2,40/1,033 = 2,33 m³ de gas seco.

C en gas seco = (1x0,48 + 1x0,013)x2,33x(12/22,4) = 0,616 Kg.

Coque en gas de agua = 0,616/0,9 = 0,682

Coque en gas de agua = 68,2% (21-1)

Coque en gas de aire = 100 - 68,2 = 31,8%

Coque en gas de aire = 31,8% (21-1)

2

P.C.B. coque = 8100x0,9 = 7290 Kcal/Kg.

P.C.B. gas de agua = 2,33x(0,507x2582 + 0,48x3034) = 6445 kcal

P.C.B. gas de agua = 6445/7290 = 0,885 de la del coque

P.C.B. gas de agua = 88,5% de la del coque (21-2)

3
Etapa de vapor:

Cálculo del calor sensible del gas:

$$\begin{aligned} H_2 &= 2,33 \times 0,507 \times (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 379 \text{ Kcal} \\ CO &= 2,33 \times 0,48 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 363 \text{ Kcal} \\ CO_2 &= 2,33 \times 0,013 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 15 \text{ Kcal} \\ H_2O &= (2,40 - 2,33) \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 30 \text{ Kcal} \\ \text{Calor sensible en gas} &= 787 \text{ Kcal} \\ \text{Calor sensible, gas de agua} &= 787/7290 = 0,108 \\ \text{Calor sensible, gas de agua} &= 10,8\% \text{ P.C.B del coque (21-3)} \end{aligned}$$

Etapa de aire:

$$\begin{aligned} C \text{ total gas de aire} &= 0,9 \times 0,318 = 0,2862 \text{ Kg.} \\ C \text{ en gas de aire} &= 0,21 (12/22,4) = 0,113 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas} \\ \text{Gas de aire} &= 0,286/0,113 = 2,53 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del calor sensible del gas de aire:

$$\begin{aligned} CO_2 &= 2,53 \times 0,21 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 264 \text{ Kcal} \\ N_2 &= 2,53 \times 0,79 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 648 \text{ Kcal} \\ \text{Calor sensible} &= 912 \text{ Kcal} \\ \text{Calor sensible, gas de aire} &= 912/7290 = 0,125 \\ \text{Calor sensible, gas de aire} &= 12,5\% \text{ P.C.B del coque (21-3)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°22 (7)

Un productor de gas de agua, utiliza un carbón que contiene 90%C y 10%R. El productor es alimentado con aire solamente durante 7,5 minutos y luego con vapor solamente durante 4 minutos, habiéndose consumido el carbono a la misma rata por minuto, durante cada uno de estos ciclos.

El 2% del carbono se pierde en las cenizas.

El ciclo aire quema la mitad del carbono a CO y la mitad a CO₂, mientras que el ciclo vapor lo quema todo a CO.

Solamente se descomponen los 4/5 del vapor soplado

PREGUNTAS

1. El volumen de gas de agua producido, por metro cúbico de gas de aire producido.
2. La potencia calorífica, por metro cúbico de gas de aire y de gas de agua.
3. El porcentaje de la potencia calorífica original del carbón, que está disponible en el gas de agua y en el gas de aire.
4. Los metros cúbicos de aire utilizados, por kilogramo de vapor; y los metros cúbicos de aire y los kilogramos de vapor utilizados, por kilogramo de carbon

SOLUCION

1.
Distribución del C en los diferentes ciclos:

$$\begin{aligned} C \text{ en cenizas} &= 0,9 \times 0,02 = 0,018 \text{ Kg.} \\ C \rightarrow \text{gas} &= 0,9 - 0,018 = 0,882 \text{ Kg.} \\ \text{Tiempo total del proceso} &= 7,5 + 4 = 11,5 \text{ min.} \\ C \rightarrow \text{gas de aire} &= 0,882 \cdot (7,5/11,5) = 0,576 \text{ Kg.} \\ C \rightarrow \text{gas de agua} &= 0,882 - 0,576 = 0,306 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Cálculo del gas de aire:

Reacciones



$$O_2 = 0,576[(1,5 \times 22,4) + (12 \times 2)] = 0,806 \text{ m}^3$$

$$CO = 0,806/1,5 = 0,538 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 0,538 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 0,806 \cdot (79/21) = 3,03 \text{ m}^3$$

$$\text{Total gas de aire} = 3,03 + 0,538 + 0,538 = 4,106 \text{ m}^3$$

Cálculo del gas de agua:



$$CO = 0,306 \cdot (22,4/12) = 0,571 \text{ m}^3 = H_2$$

$$O_2 \text{ de este} = 0,571/2 = 0,2855 \text{ m}^3$$

$$\text{Total } O_2 = 0,2855/(4/5) = 0,357 \text{ m}^3$$



$$H_2O = 0,357 \times 2 = 0,714 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ no descompuesto} = 0,714 \cdot (1/5) = 0,1428 \text{ m}^3$$

$$\text{Total gas de agua} = CO + H_2 + H_2O = 2 \times 0,571 + 0,143 = 1,285 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas de agua} = 1,285/4,106 = 0,312 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ gas de aire}$$

$$\text{Gas de agua} = 0,312 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas de aire (22-1)}$$

2

Gas de aire

$$CO = 100 \cdot (0,538/4,106) = 13,10\%$$

$$CO_2 = CO = 13,10\%$$

$$N_2 = 100 - 13,1 \times 2 = 73,8\%$$

$$P.C.B. \text{ gas de aire} = 0,131 \times 3034 = 397 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P.C.B. \text{ gas de aire} = 397 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (22-2)}$$

Gas de agua.

$$P.C.B. \text{ gas de agua} = P(CO) + P(H_2)$$

$$P.C.B. \text{ gas de agua} = 3034 \cdot (0,571/1,285) + 2582 \cdot (0,571/1,285) = 2500 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P.C.B. \text{ gas de agua} = 2500 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (22-2)}$$

3

$$P.C.B. \text{ carbón} = 8100 \times 0,9 = 7290 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B. \text{ gas de aire} = 397 \times 4,106 = 1630 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B. \text{ gas de aire} = 1630/7290 = 0,224$$

$$P.C.B. \text{ gas de aire} = 22,4\% \text{ de la del carbón (22-3)}$$

$$P.C.B. \text{ gas de agua} = 2500 \times 1,285 = 3212 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B. \text{ gas de agua} = 3212/7290 = 0,44$$

$$P.C.B. \text{ gas de agua} = 44\% \text{ de la del carbón (22-3)}$$

4

$$\text{Aire utilizado} = 0,806/0,21 = 3,84 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire utilizado} = 3,84 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (22-4)}$$

$$\text{Vapor} = 0,714 \cdot (18/22,4) = 0,576 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor} = 0,576 \text{ Kg./Kg. de carbón (22-4)}$$

$$\text{Aire utilizado} = 3,84/0,576 = 6,66 \text{ m}^3/\text{Kg. de vapor.}$$

$$\text{Aire utilizado} = 6,66 \text{ m}^3/\text{Kg. de vapor. (22-4)}$$

EJERCICIO N°23 (7)

Un carbón contiene:

Materia volátil	25%
Carbono fijo	60
H ₂ O	3
R	12

La potencia calorífica (baja) de la materia volátil es 9250 Kcal/Kg.

La potencia calorífica del carbono fijo es 8100 Kcal./Kg.

El carbón es utilizado en un productor de gas, en el cual la materia volátil es primero destilada en el gas sin combustión.

La composición del gas producido es la materia volátil + H₂O del carbón + gas de la combustión del carbono fijo (asumir que se quema a CO).

PREGUNTAS

1. El volumen de aire requerido, por kilogramo de carbón utilizado.
2. Si no hay agua en el aire requerido al soplar el productor, ¿cuál es la potencia calorífica del gas, en porcentaje de la potencia calorífica del carbón?
3. ¿Cuánto vapor (en kilogramos), por kilogramo de carbón utilizado, será necesario para absorber la mitad del calor generado en el productor, despreciando el calor sensible en el vapor?
4. ¿Cuál sería la potencia calorífica del gas, en porcentaje de la potencia calorífica del carbón cuando es utilizado este vapor?

SOLUCION

1.

Reacción de combustión:



$$O_2 = 0,6 \cdot (11,2/12) = 0,56 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire} = 0,56/0,21 = 2,67 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire requerido} = 2,67 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (23-1)}$$

2.

Cálculo de la potencia calorífica del gas:

$$CO = 0,56 \times 2 = 1,12 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C.B del gas} = CO + \text{materia volátil}$$

$$CO = 1,12 \times 3034 = 3398 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Materia volátil} = 9250 \times 0,25 = 2313 \text{ Kcal.}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 3398 + 2313 = 5711 \text{ Kcal.}$$

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

$$\text{P.C.B del carbon} = 8100C + 34000 \cdot (H - O/8) + 2200S + 586 \cdot (9H + W) + \text{Materia volátil}$$

$$\text{P.C.B del carbon} = 8100 \times 0,6 + 0 + 0 + 586 \times 0,03 + 2313 = 7155 \text{ Kcal}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 5711/7155 = 0,798 \text{ de la del carbón.}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 79,8\% \text{ de la del carbón (23-2)}$$

3.

El vapor quema el C caliente, de acuerdo a la siguiente reacción:



En esta reacción la oxidación del C a CO, por supuesto, genera la misma cantidad de calor que si hubiera sido quemado por aire, pero la descomposición del vapor que lo acompaña absorbe calor. Tal como le muestra la reacción, la descomposición del vapor libera H₂, y esto absorbe una cantidad de calor igual al calor generado cuando el H₂ es quemado a H₂O (g).

Esto se puede ver en la tabla sobre calores de formacion (Tabla XLII del Apéndice), y es igual a 28680 Kcal. por kilogramo de H_2 , equivalente a 3210 Kcal por kilogramo de vapor o a 57801 Kcal por mol de vapor ; o a 4820 Kcal por kilogramo de C oxidado en la reacción.

Calor generado cuando $C \rightarrow CO = 1,12 \cdot (12/22,4) \times 2430 = 1458$ Kcal.

(El calor generado cuando $C \rightarrow CO = 2430$ Kcal./Kg. de C)

$\frac{1}{2}$ calor generado = $1458/2 = 729$ Kcal.

vapor = 729 Kcal \div 57801 Kcal./mol de vapor = $0,0126$ moles de H_2O

1 mol = Peso/Peso molecular

Vapor = $0,0126 \times 18 = 0,2268$ Kg.

Vapor = $0,227$ Kg./Kg. de carbón (23-3)

4.

$H_2O = 0,227 \cdot (22,4/18) = 0,28$ m³ = H_2

P.C.B del gas = CO + H_2 + Materia volátil.

P.C.B del gas = $3398 + 2313 + 0,28 \times 2582 = 6434$ Kcal

P.C.B del gas = $6434/7155 = 0,899$ de la del carbón.

P.C.B del gas = $89,9\%$ de la del carbón (23-4)

EJERCICIO N°24 (7)

Un carbón bituminoso utilizado en un productor de gas contiene:

Humedad	1%	C	78%
Materia volátil	21	H	5
Carbono fijo	70	O	8
R	8	R	8
		H_2O	1

El gas producido, sin utilización de vapor contiene (seco):

CO	35%
CO ₂	5
CH ₄	5
H ₂	5
N ₂	50

El gas sale del productor a 500°C.

La potencia calorífica del carbón (práctica o baja), es de 7480 Kcal.

PREGUNTAS

1. El volumen del gas producido, por kilogramo de carbon.
2. La potencia calorífica del gas producido, por metro cúbico.
3. ¿Que proporcion del requerimiento 2 es debido a la materia volátil, y que proporcion al gas real producido?
4. ¿Cuánto mayor sería la potencia calorífica del gas para 1 kilogramo de carbon, si se introducen 0,3 kilogramos de vapor por kilogramo de carbon, asumiendo que todo se descompone en el productor?
5. ¿Cuál sería la composicion del gas producido en el requerimiento 4?

SOLUCION

1

Para 1 Kilogramo de carbón:

El C del CH₄ se encuentra como materia volátil.

$$C \rightarrow CH_4 = 78 - 70 = 8\%$$

$$CH_4 = 0,08 \cdot (22,4/12) = 0,15 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón.}$$

Gas húmedo = Gas seco + Humedad

Supongamos 1 m³ de gas seco.

$$\text{Humedad} = 0,01 \cdot (22,4/18) = 0,0124 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas húmedo} = 1 + 0,0124 = 1,0124 \text{ m}^3$$

$$CH_4 \text{ en el gas húmedo} = 0,05 \cdot 1,0124 = 0,049 \text{ m}^3 \text{ m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 0,15 (\text{m}^3/\text{Kg. de carbón}) \cdot 0,049 (\text{m}^3 \text{ m}^3 \text{ de gas}) = 3,061$$

$$\text{Gas} = 3,061 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (24-1)}$$

2

$$P.C.B \text{ del gas} = CO + CH_4 + H_2$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,35 \cdot 3034 + 0,05 \cdot 8560 + 0,05 \cdot 2582 = 1619 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B \text{ del gas producido} = 1619 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (24-2)}$$

3.

La materia volátil contiene CH₄ y H₂, así:

$$P.C.B \text{ de materia volátil} = 0,05 \cdot 8560 + 0,05 \cdot 2582 = 557,10 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B. \text{ materia volátil} = 557,1 / 1619 = 0,344 \text{ de la del gas}$$

$$P.C.B. \text{ materia volátil} = 34,4\% \text{ de la del gas producido (24-3)}$$

Reacción de gasificación



Esta reacción absorbe 3210 Kcal por Kg. de vapor.

$$\text{Calor consumido} = 3210 \cdot 0,01 = 32,1 \text{ Kcal.}$$

$$\text{La producción de CO genera } 0,35 \cdot 3034 = 1061,9 \text{ Kcal}$$

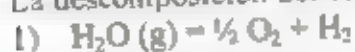
$$\text{Calor neto de la reacción} = 1061,9 - 32,1 = 1029,8 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor neto reacción} = 1029,8 / 1619 = 0,636 \text{ del gas producido}$$

$$\text{Calor neto de reacción} = 63,6\% \text{ del de gas producido (24-3)}$$

4

La descomposición del vapor se puede interpretar de acuerdo a las reacciones.



En la reacción (1) se absorbe una cantidad de calor igual al calor de formación del vapor de agua (= 57801 Kcal/mol de agua) y esta misma cantidad de calor la reserva el H₂ para aumentar el poder calorífico del gas, así:

$$\text{Aumento en poder calorífico} = 57801 (0,3 / 18) = 963,35 \text{ Kcal}$$

Pero 1 Kg. de carbón supone 3 m³ de gas, entonces.

$$\text{Aumento en poder calorífico del gas} = 963,35 \cdot 3 = 321 \text{ Kcal. m}^3$$

$$\text{Aumento en poder calorífico del gas} = 321 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (24-4)}$$

5

Al descomponerse el H₂O tendríamos:

$$O_2 = 0,3 \cdot (16/18) \cdot (22,4/32) = 0,187 \text{ m}^3$$

$$\text{Este } O_2 \text{ supone la eliminación de } N_2 = 0,187 (79,21) = 0,702 \text{ m}^3$$

$$H_2 \text{ adicional} = 0,3 \cdot (22,4/18) = 0,373 \text{ m}^3$$

La composición del gas original era:

$$CO = 0,35 \text{ m}^3 = 34,57\%$$

$$CO_2 = 0,05 = 4,94$$

$$CH_4 = 0,05 = 4,94$$

$$H_2 = 0,05 = 4,94$$

$$N_2 = 0,50 = 49,39$$

$$H_2O = \frac{0,0124 \text{ m}^3}{1,0214 \text{ m}^3} = 1,22\%$$

$$100,00\%$$

La composición del nuevo gas será: (24-5)

$\text{CO} = 3,061 \times 0,3457 =$	$1,058 \text{ m}^3 =$	$38,85\%$
$\text{CO}_2 = 3,061 \times 0,0494 =$	$0,151 =$	$5,54$
$\text{CH}_4 = 3,061 \times 0,0494 =$	$0,151 =$	$5,54$
$\text{H}_2 = 3,061 \times 0,0494 + 0,373 =$	$0,524 =$	$19,23$
$\text{N}_2 = 3,061 \times 0,5 - 0,702 =$	$0,8285 =$	$30,40$
$\text{H}_2\text{O} =$	$\frac{0,0124 \text{ m}^3}{2,7249 \text{ m}^3} =$	$\frac{0,46\%}{100,00\%}$

EJERCICIO N°25 (7)

Un carbón bituminoso contiene:

C	78%
H	5
O	8
R	9

Cuando es utilizado en un pequeño productor de gas, sin vapor, produjo el siguiente gas (análisis seco)

CO	35%
CO ₂	5
CH ₄	5
H ₂	5
N ₂	50

La cantidad de cenizas equivale al 13% del peso del carbón.

El gas salió del productor a 500°C

El carbón fue luego utilizado en un productor grande, y se soplo suficiente vapor para reducir las pérdidas de calor como calor sensible en los gases calientes en 1/4 y las pérdidas por radiación, convección y conducción en 1/3

Assumir que los volúmenes de CO₂ y CH₄, y la cantidad de cenizas producidas en este productor fueron los mismos que en el pequeño.

PREGUNTAS

- 1 El volumen del gas (seco) producido, por kilogramo de carbón, en el productor pequeño.
- 2 La potencia calorífica de este gas, y el porcentaje de la potencia calorífica del carbón representada en el gas.
- 3 El número de calorías perdidas en este productor por kilogramo de carbón
 - a. A través del carbono sin quemar en las cenizas.
 - b. Como calor sensible en el gas.
 - c. Por radiación, conducción y convección combinadas (por diferencia)
- 4 Los kilogramos de vapor soplados, por kilogramo de carbón, en el productor grande (asumir todo el vapor descompuesto, y despreciar su contenido de calor sensible)
- 5 La composición del gas (%) producido en este productor.
- 6 La potencia calorífica de este gas, por metro cúbico, y el porcentaje de la potencia calorífica del carbón que está disponible en él

SOLUCION

1

U.C. = Cenizas - R

$$U.C. = 0,13 - 0,09 = 0,04 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,78 - 0,04 = 0,74 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C en 1 m³ de gas:

$$C = (0,35 + 0,05 + 0,05) \cdot (12/22,4) = 0,241 \text{ kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 0,74/0,241 = 3,07 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas seco} = 3,07 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (25-1)}$$

2

Cálculo de la potencia calorífica del gas (ver Tabla 1 del Apéndice)

$$\text{CO} = 0,35 \times 3034 = 1062 \text{ Kcal.}$$

$$\text{CH}_4 = 0,05 \times 8560 = 428$$

$$\text{H}_2 = 0,05 \times 2582 = \frac{129 \text{ Kcal}}{1619 \text{ Kcal/m}^3}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 1619 \text{ Kcal/m}^3$$

$$\text{P.C.B del gas} = 1619 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (25-2)}$$

Cálculo de la potencia calorífica del carbón.

$$\text{P.C.B} = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H - W)$$

$$\text{P.C.B} = 8,00 \times 0,78 + 34000(9 \times 0,05 - 0) + 0 - 586(9 \times 0,05 + 0) = 7414 \text{ Kcal. Kg}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 1619 \times 3,07/7414 = 0,671 \text{ de la del carbón.}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 67,1\% \text{ de la del carbón (25.2)}$$

3

a.

$$\text{P.C.B del U.C} = 8100 \times 0,04 = 324 \text{ Kcal.}$$

$$\text{P.C.B del U.C} = 324 \text{ Kcal/Kg. de carbón (25-3.a)}$$

b

Cálculo del volumen de los gases

$$\text{CO} = 0,35 \times 3,07 = 1,075 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} + \text{CH}_4 = 1,075 + 0,05 \times 3,07 = 0,1535 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 0,5 \times 3,07 = 1,535 \text{ m}^3$$

Cálculo del calor sensible del gas (ver tabla XV del Apéndice)

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 2,61(0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 408 \text{ Kcal}$$

$$\text{CO}_2 = 0,1535(0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 34 \text{ Kcal}$$

$$\text{CH}_4 = 0,1535(0,380 + 21,0 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 37 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2 = 0,1535(0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 500) \times 500 = 24 \text{ Kcal.}$$

$$\Sigma = 503 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor sensible en el gas} = 503 \text{ Kcal/Kg. de carbón (25-3 b)}$$

c.

$$\text{Potencia calorífica aprovechable} = 7414 \times 0,671 = 4975 \text{ Kcal}$$

$$\text{Perdidas por convección, conducción y radiación} = 7414 - 4975 = 324 + 503 = 1612 \text{ Kcal}$$

$$\text{Perdidas por convección, radiación y conducción} = 1612 \text{ Kcal. (25-3 c)}$$

4

En el productor grande:

$$\text{F calor de formación del vapor de agua} = 3210 \text{ Kcal. Kg. de vapor}$$

$$\text{Reducción de las pérdidas en los gases} = 503(1,4) = 126 \text{ Kcal}$$

$$\text{Reducción de las pérdidas por radiación, etc.} = 1612(1,3) = 537 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor reducido} = 126 + 537 = 663 \text{ Kcal}$$

$$\text{Vapor soplado} = 663 \text{ Kcal} + 3210 (\text{Kcal/Kg. de vapor}) = 0,207 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor soplado} = 0,207 \text{ Kg. (25-4)}$$

Reacción de descomposición del vapor de agua.



El volumen inicial de CO no varía en virtud de que el que parte del que se debió producir por el (3) del aire no produce esta reacción, por tanto, el que si disminuye es el N_2

$$H_2 \text{ adicional} = 0,207 \cdot (22,4/18) = 0,2576 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ equivalente} = 0,2576 \cdot (1/2) \cdot (79/21) = 0,4845 \text{ m}^3$$

Composición del gas (25-5)

$$N_2 = 3,07 \times 0,5 - 0,4845 = 1,0505 \text{ m}^3 = 36,95\%$$

$$H_2 = 3,07 \times 0,05 + 0,2576 = 0,4111 \text{ m}^3 = 14,46\%$$

$$CO = 3,07 \times 0,35 = 1,0745 \text{ m}^3 = 37,79\%$$

$$CO_2 = 3,07 \times 0,05 = 0,1535 \text{ m}^3 = 5,40\%$$

$$CH_4 = 3,07 \times 0,05 = 0,1535 \text{ m}^3 = 5,40\%$$

$$2,8431 \text{ m}^3 \quad 100,00\%$$

6

Cálculo de la potencia calorífica de este gas:

$$P.C.B \text{ del gas} = CO + CH_4 + H_2$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,3779 \times 3034 + 0,0540 \times 8560 + 0,1446 \times 1582 = 1982,15 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 1982,15 \text{ Kcal/m}^3 \quad (25-6)$$

Potencia calorífica del carbón = 7414 Kcal/Kg.

$$P.C.B \text{ del gas} = 1982,15 \times 2,8431 / 7414 = 0,76 \text{ de la del carbón}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 76,0\% \text{ de la del carbón} \quad (25-6)$$

EJERCICIO N°26 (7)

Un productor de gas utiliza el siguiente carbón.

C	77,5%
H	3,0
O	6,0
H ₂ O	3,5
R	10,0

Las cenizas del productor de gas tienen 20% de carbono que no reacciona

El productor fue alimentado con una mezcla de aire y vapor, 4/5 del carbono que reacciona fue quemado por aire y 1/5 por vapor

Solamente el 80% del vapor soplado se descompuso.

Del carbono quemado por aire, 1/3 pasa a CO_2 el balance pasa a CO

El oxígeno del carbon se combina con carbono, asumir que todo el hidrogeno del carbon permanece sin combinar.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido en el productor por kilogramo de carbon
2. El porcentaje del calor generado por la combustión del carbono en el productor que es absorbido por descomposición del vapor

SOLUCION

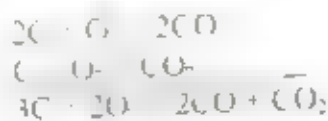
$$\text{Gas} = CO_2 + CO + N_2 + H_2 + H_2O$$

$$\text{Cenizas (100\%)} = R (80\%) + U.C (20\%)$$

$$U.C = 0,1 \cdot (20/80) = 0,025 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ total en gas} = 0,775 - 0,025 = 0,75 \text{ Kg}$$

La reacción de combustión por aire, se plantea así:



$$\begin{aligned} C \text{ para aire} &= 0,75 (4/5) = 0,6 \text{ Kg} \\ C \text{ para vapor} &= 0,75 - 0,6 = 0,15 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Sobre la base de las reacciones:

$$\begin{aligned} O_2 = CO &= 0,6 \cdot (2 \times 22,4/3 \times 12) = 0,747 \text{ m}^3 \\ C + \frac{1}{2} O_2 &= 0,747/2 = 0,373 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Al oxígeno del carbon, vamos a darle el mismo tratamiento que al del aire

$$\begin{aligned} O_2 \text{ del carbon} &= 0,06 \cdot (22,4/32) = 0,042 \text{ m}^3 \\ O_2 \text{ del aire} &= 0,747 - 0,042 = 0,705 \text{ m}^3 \\ N_2 &= 0,705 \cdot (79/21) = 2,652 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Descomposición del vapor

$$\begin{aligned} C + H_2O &= CO + H_2 \\ CO = H_2 &= 0,15 \cdot (22,4/12) = 0,28 \text{ m}^3 = H_2O \text{ descompuesta.} \\ H_2O \text{ no descompuesta} &= 0,28 \cdot (20/80) = 0,07 \text{ m}^3 \\ H_2O \text{ en gas} &= 0,07 + 0,035 \cdot (22,4/18) = 0,114 \text{ m}^3 \\ H_2 \text{ en gas} &= 0,28 + 0,03 \cdot (22,4/2) = 0,616 \text{ m}^3 \\ CO \text{ en gas} &= 0,28 + 0,747 = 1,027 \text{ m}^3 \\ Gas &= 0,373 + 2,652 + 0,616 + 1,027 + 0,114 = 4,785 \text{ m}^3 \\ Gas producido &= 4,785 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbon. (26-1)} \end{aligned}$$

2

Calor generado cuando:

$$\begin{aligned} C \rightarrow CO_2 &= 0,373 \cdot (12/22,4) \times 8100 = 1618,6 \text{ Kcal} \\ C \rightarrow CO &= 1,027 \cdot (12/22,4) \times 2430 = 1337 \text{ Kcal} \\ Total calor generado por combustión del C &= 1618,6 + 1337 = 2955,6 \text{ Kcal} \\ Calor de descomposición del vapor &= 0,28 \times (18 \cdot 22,4) \times 3210 = 722,3 \text{ Kcal} \\ Calor de descomposición &= 722,3/2955,6 = 0,2444 \\ Calor de descomposición &= 24,44\% \text{ del de combustión (26-2)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°27 (7)

Un coque de la composición C, 76% H₂O 6%, R, 18% es utilizado en un proceso de gas, produciendo una mezcla de gases

La cantidad de vapor es de 1 kilogramo por cada 8 metros cúbicos de aire pero solamente el 75% de este vapor es descompuesto.

Asumir que el gas no contiene hidrocarburos, y despreciar el carbono en las cenizas.

Del carbono quemado por el aire, 3% pasa a CO y 1% a CO₂, todo el carbono consumido por el vapor pasa a CO

PREGUNTAS

1. Los porcentajes del carbono consumido por el aire y por el vapor
2. El volumen y composición del gas producido, por kilogramo de coque.

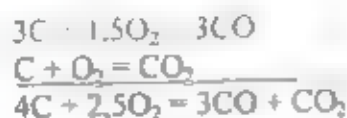
SOLUCION

1

$$\begin{aligned} Vapor descompuesto &= 0,75 \text{ Kg} \\ O_2 \text{ del aire} &= 0,21 \times 8 = 1,68 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

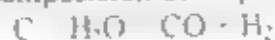
Reacciones de combustión con aire:

Debido a que 3 4C va a CO y 1 4C a CO₂, la estequiometria de la reacción seria



$$C = 1,68 \times 4 \times 12 / 2,5 \times 22,4 = 1,44 \text{ Kg}$$

Reacción de descomposición del vapor



$$C = 0,75(12/18) = 0,5 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ total oxidado} = 1,44 + 0,5 = 1,94 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ oxidado por aire} = 1,44 / 1,94 = 0,742$$

$$C \text{ oxidado por aire} = 74,2\% (27-1)$$

$$C \text{ oxidado por vapor} = 0,5 / 1,94 = 0,258$$

$$C \text{ oxidado por vapor} = 25,8\% (27-1)$$

2

Para 1 Kg. de coque:

$$C \text{ para el aire} = 0,76 \times 0,742 = 0,564 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ para el vapor} = 0,76 - 0,564 = 0,196 \text{ Kg.}$$

Gases producidos en la reacción con aire:

$$O_2 \text{ del aire} = 0,564 \times 2,5 \times 22,4 / 4 \times 12 = 0,66 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ de este} = 0,66 (79/21) = 2,47 \text{ m}^3$$

$$CO = 0,66 (3/2,5) = 0,79 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 0,66 / 2,5 = 0,263 \text{ m}^3$$

Gases producidos en la reacción con el vapor.

$$CO = H_2 = H_2O \text{ descompuesto} = 0,196 \cdot (22,4/12) = 0,366 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ no descompuesto} = 0,366 \cdot (25/75) = 0,122 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ del coque} = 0,06 \cdot (22,4/18) = 0,0746 \text{ m}^3$$

Volumen y composición del gas (27-2)

$$CO = 0,79 + 0,366 = 1,1560 \text{ m}^3 = 25,97\%$$

$$CO_2 = 0,2630 \text{ m}^3 = 5,91\%$$

$$N_2 = 2,4700 \text{ m}^3 = 55,48\%$$

$$H_2 = 0,3660 \text{ m}^3 = 8,22\%$$

$$H_2O = 0,122 + 0,0746 = 0,1966 \text{ m}^3 = 4,42\%$$

$$4,4516 \text{ m}^3 = 100,00\%$$

EJERCICIO N°28 (7)

El productor de gas de la New Jersey Zinc Company en Palmerton, Pa., quema carbon antracita, la composición del cual es aproximadamente la siguiente:

C	88%
H ₂ O	3
R	9

Los productores son alimentados con una mezcla de aire y vapor con teni endo 1 m³ de vapor en volumen 40% del vapor es descompuesto en el productor formando CO e hidrogeno

El aire forma CO y CO₂ en la proporción de 4 : 1 Las cenizas del productor contienen 12% de carbono sin quemar (UC)

PREGUNTAS

- 1 El volumen y composición en porcentaje del gas producido, por kilogramo de carbon.
- 2 La cantidad de calor economizado por el uso del vapor, y la proporción de la potencia calorífica del gas representada por esta cantidad.

SOLUCION

$$C \text{ en cenizas} = 0,09 \cdot (12/88) \approx 0,0123 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ oxidado} = 0,88 - 0,0123 = 0,8677 \approx 0,87 \text{ Kg.}$$

Si tomamos 1 m^3 de mezcla:

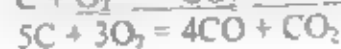
$$\text{Aire} = 6/7 \approx 0,857 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor} = 1 - 0,857 = 0,143 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire} = 0,857 \times 0,21 = 0,18 \text{ m}^3$$

Reacciones con el aire:

Dado que la proporción $CO:CO_2 = 4:1$, el balance de la reacción con aire quedaría



$$C = 0,18 \times 5 \times 12 / 3 \times 22,4 = 0,161 \text{ Kg./m}^3 \text{ de mezcla.}$$

Reacción con vapor:



$$\text{Vapor descompuesto} = 0,143 \times 0,9 = 0,1287 \text{ m}^3$$

$$C \text{ de este} = 0,1287 (12/22,4) = 0,0689 \text{ Kg./m}^3 \text{ de mezcla}$$

$$C \text{ total} = 0,161 + 0,0689 = 0,2299 \text{ Kg./m}^3 \text{ de mezcla.}$$

$$\%C \text{ para aire} = 0,161 / 0,2299 = 70,03\%$$

$$\%C \text{ para el vapor} = 100 - 70,03 = 29,97\%$$

$$C \text{ para aire} = 0,8677 \times 0,7003 = 0,608 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ para vapor} = 0,8677 - 0,608 = 0,2597 \text{ Kg.}$$

Cálculo del volumen de los gases producidos con aire

$$O_2 \text{ del aire} = 0,608 \times 3 \times 22,4 / 5 \times 12 = 0,681 \text{ m}^3$$

$$CO \text{ por aire} = 0,681 \cdot (4/3) = 0,910 \text{ m}^3$$

$$CO_2 \text{ por aire} = 0,681 / 3 = 0,227 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 0,681 \cdot (79/21) = 2,57 \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen de los gases producidos con vapor.

$$CO \text{ por vapor} = 0,2597 (22,4/12) = 0,484 \text{ m}^3 = H_2 = H_2O$$

$$H_2O \text{ no descompuesta} = 0,484 (10/90) = 0,054 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ del carbón} = 0,03 \cdot (22,4/18) = 0,037 \text{ m}^3$$

Volumen y composición del gas producido (28-1)

$$CO = 0,910 + 0,484 = 1,394 \text{ m}^3 = 29,3\%$$

$$CO_2 = 0,227 \text{ m}^3 = 4,8\%$$

$$N_2 = 2,570 \text{ m}^3 = 53,9\%$$

$$H_2 = 0,484 \text{ m}^3 = 10,2\%$$

$$H_2O = 0,540 + 0,037 = 0,091 \text{ m}^3 = 1,9\%$$

$$4,766 \text{ m}^3 = 100,0\%$$

2.

El calor de descomposición del vapor de agua = 57801 Kcal/mol.

Vapor descompuesto = $0,484 \cdot (18/22,4) = 0,389$ Kg.

Calor economizado = $57801 \cdot (0,389/18) = 1250$ Kcal.

Este calor es el aporte del H_2 a la potencia calorífica del gas

= $0,484 \times 2582 = 1250$ Kcal

Calor economizado por el uso del vapor = 1250 Kcal. (28-2)

P.C.B del gas = $CO + H_2$

P.C.B del gas = $3034 \times 1,394 + 2582 \times 0,484 = 5479$ Kcal.

Calor economizado = $1250/5479 = 0,229$

Calor economizado = 22,9% de la P.C.B del gas (28-2)

EJERCICIO N°29 (7)

El siguiente carbón fue utilizado en un productor de gas.

C	75%	S	3%
H	4	H_2O	5
O	6	R	7

Las cenizas pesaron el 10% del peso del carbon

Por kilogramo de carbón se utilizaron 3,1 metros cúbicos de aire, asumido seco.

Del carbono que entra al productor de gas, 2/3 pasan a CO , 1/4 a CO_2 y 1/12 pasan a CH_4 .

Asumir que todo el CO en el gas resulta de la reacción con el aire, nada se forma por la

reacción con vapor

El hidrogeno del carbon no se oxida, el oxigeno del carbon forma CO y CO_2

Parte del aire se utiliza en quemar todo el azufre a SO_2 .

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de vapor utilizados, por kilogramo de carbón.
2. Los metros cubicos de gas producidos, por kilogramo de carbon
3. El porcentaje de la potencia calorífica del carbon que esta representado en el gas

SOLUCION

1.

Las reacciones del proceso son:



Cenizas = R + U.C

U.C = $0,1 - 0,07 = 0,03$ Kg.

C que reacciona = $0,75 - 0,03 = 0,72$ Kg.

$C \rightarrow CO$ = $0,72 (2/3) = 0,48$ Kg.

$C \rightarrow CO_2$ = $0,72 (1/4) = 0,18$ Kg.

$C \rightarrow CH_4$ = $0,72 (1/12) = 0,06$ Kg.

Peso del aire = $3,1 \times 1,293 = 4,0083$ Kg.

O del aire = $4,0083 \times 0,232 = 0,93$ Kg.

O del S = $0,03 (32/32) = 0,03$ Kg.

O del aire a CO y CO_2 = $0,93 - 0,03 = 0,90$ Kg

$$\begin{aligned}
 \text{O total a CO} &= 0,48 (16/12) = 0,64 \text{ Kg.} \\
 \text{O total a CO}_2 &= 0,18 (32/12) = 0,48 \text{ Kg.} \\
 \text{Total O a CO y CO}_2 &= 0,64 + 0,48 = 1,12 \text{ Kg.} \\
 \text{O del vapor} &= 1,12 - 0,06 - 0,9 = 0,16 \text{ Kg.} \\
 \text{Vapor} &= 0,16 (18/16) = 0,18 \text{ Kg.} \\
 \text{Vapor} &= 0,18 \text{ Kg./Kg. de carbón (29-1)}
 \end{aligned}$$

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2$$

$$\begin{aligned}
 \text{CO} &= 0,48 (22,4/12) = 0,896 \text{ m}^3 \\
 \text{CO}_2 &= 0,18 (22,4/12) = 0,336 \text{ m}^3 \\
 \text{CH}_4 &= 0,06 (22,4/12) = 0,112 \text{ m}^3 \\
 \text{N}_2 &= 3,1 \times 0,79 = 2,449 \text{ m}^3 \\
 \text{SO}_2 &= 0,03 (22,4/32) = 0,021 \text{ m}^3 \\
 \text{H}_2 &= 0,04 (22,4/2) + 0,18 (22,4/18) - 2 \times 0,112 = 0,448 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gas} &= 0,896 + 0,336 + 0,112 + 2,449 + 0,021 + 0,448 = 4,262 \text{ m}^3 \\
 \text{Gas producido} &= 4,262 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (29-2)}
 \end{aligned}$$

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:
 $\text{P.C.B} = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W)$
 $\text{P.C.B} = 8100 \times 0,75 + 34000 \times 0,04 - 0,06/8 + 2200 \times 0,03 - 586(9 \times 0,04 + 0,05)$
 $= 7005,7 \text{ Kcal/Kg.}$

Cálculo de la potencia calorífica del gas
 $\text{P.C.B del gas} = \text{CO} + \text{CH}_4 + \text{H}_2$
 $\text{P.C.B del gas} = 0,896 \times 3034 + 0,112 \times 8560 + 0,448 \times 2582 = 4833,9 \text{ Kcal}$
 $\text{P.C.B del gas} = 4833,9/7005,7 = 0,69$
 $\text{P.C.B del gas} = 69\% \text{ de la del carbón (29-3)}$

EJERCICIO N°30 (7)

Un productor de gas utiliza carbón del siguiente contenido:

C	75%	O	6%
H	4	H ₂ O	6
R	9		

Este productor es suministrado con aire y vapor en la relación de 7 metros cúbicos de aire por cada kilogramo de vapor.

Asumir que la humedad del carbón se evapora y aparece como vapor de agua en el gas producido

El 80% del vapor suministrado se descompone y el 20% pasa al gas como vapor de agua.
 El 90% del carbono que es quemado por el aire pasa a CO y el 10% a CO₂.

Asumir que el oxígeno de carbón reacciona con el carbono y forma CO y CO₂ en la misma relación que el oxígeno del aire.

Todo el carbono quemado por el vapor pasa a CO

El 5% del carbono del carbón forma CH₄ y el 2% se pierde en las cenizas.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producidos, por kilogramo de carbón
2. La composición del gas producido.
3. El porcentaje del carbono total que es quemado por el aire y por el vapor
4. El porcentaje de la potencia calorífica del carbón que esta presente en el gas

SOLUCION

1

Cálculo del carbono para combustión.

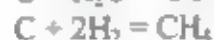
C total = 0,75 Kg.

$$C \rightarrow CH_4 = 0,75 \times 0,5 = 0,0375 \text{ Kg}$$

$$C \text{ en cenizas} = 0,75 \times 0,02 = 0,015 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ para combustión} = 0,75 - 0,0375 - 0,015 = 0,6975 \text{ Kg.}$$

Reacciones



Distribución del C para combustión:

Sea X = C consumido por el aire.

$$O \rightarrow CO = 0,9X \cdot (32/24) = 1,2X \text{ Kg.}$$

$$O \rightarrow CO_2 = 0,1X (32/12) = 0,27X \text{ Kg.}$$

Cálculo del C consumido por el oxígeno del carbón

$$1,2X + 0,27X = 0,06$$

$$X = 0,06/1,47 = 0,041 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ consumido por el O del carbón} = 0,041 \text{ Kg.}$$

$$C(\text{vapor} + \text{aire}) = 0,698 - 0,041 = 0,657 \text{ Kg.}$$

De acuerdo a la proporción aire-vapor propuesta.

$$O_2 \text{ del aire} = 7 \times 0,21 = 1,47 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidad del aire} = 1,293$$

$$\text{Peso del aire} = 7 \times 1,293 = 9,051 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del O del aire} = 9,051 \times 0,232 = 2,1 \text{ Kg}$$

$$C \text{ asumido al aire} = 2,1/1,47 = 1,43 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ asumido al vapor} = 0,8 \cdot (12/18) = 0,53 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ asumido (aire} + \text{vapor)} = 1,43 + 0,53 = 1,96 \text{ Kg.}$$

Distribución real del C (vapor + aire).

$$C \text{ para aire} = 0,657 \cdot (1,43/1,96) = 0,479 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ para vapor} = 0,657 \cdot (0,53/1,96) = 0,178 \text{ Kg.}$$

Destino de estos carbonos.

En aire:

$$C \rightarrow CO = 0,479 \times 0,9 = 0,4311 \text{ Kg}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,479 \times 0,1 = 0,0479 \text{ Kg.}$$

En el O del combustible:

$$C \rightarrow CO = 0,041 \times 0,9 = 0,0369 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0,041 \times 0,1 = 0,0041 \text{ Kg.}$$

En vapor:

$$C \rightarrow CO = 0,178 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total C para combustión} = 0,4311 + 0,0479 + 0,0369 + 0,0041 + 0,178 = 0,698 \text{ Kg.}$$

Cálculo del aire utilizado

Por reacciones

$$O_2 \text{ del } CO_2 = 0,0479 \cdot (22,4/12) = 0,089 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del CO} = 0,4311 \cdot (22,4/2 \times 12) = 0,402 \text{ m}^3$$

$$\text{Total } O_2 \text{ del aire} = 0,089 + 0,402 = 0,491 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 0,491/0,21 = 2,338 \text{ m}^3$$

Cálculo del vapor cargado.

$$\text{Vapor} = 2,338/7 = 0,334 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor cargado} = 0,334 \cdot (22,4/18) = 0,416 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 0,416 \times 0,8 = 0,333 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor no descompuesto} = 0,416 \times 0,2 = 0,083 \text{ m}^3$$

$$\text{CO del O}_2 \text{ del carbón} = 0,0369 \cdot (22,4/2 \times 12) = 0,034 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 \quad " \quad " \quad = 0,0041 \cdot (22,4/12) = 0,008 \text{ m}^3$$

Cálculo del gas formado:

$$\text{Gas formado} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$$

$$\text{CO} = 2 \times 0,402 + 2 \times 0,034 + 0,333 = 1,205 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 0,089 + 0,008 = 0,097 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 2,338 \times 0,79 = 1,847 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 = 0,04 \cdot (22,4/2) + 0,333 - 2 \times 0,053 = 0,675 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,083 + 0,06 \cdot (22,4/18) = 0,158 \text{ m}^3$$

$$\text{CH}_4 = 0,0375 \cdot (22,4/16) = 0,053 \text{ m}^3$$

$$\text{Total gas} = 4,030 \text{ m}^3$$

$$\text{Total gas formado} = 4,030 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (30-1)}$$

2

Sobre la base del cálculo de los volúmenes de cu. de las especies que componen la mezcla gaseosa en el punto anterior, tendremos:

Composición del gas producido (30-2)

$$\text{CO} = 29,9\%$$

$$\text{CO}_2 = 2,4\%$$

$$\text{N}_2 = 45,8\%$$

$$\text{H}_2 = 16,7\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 3,9\%$$

$$\text{CH}_4 = 1,3\%$$

3

$$\text{C total} = 0,75 \text{ Kg.}$$

$$\text{C quemado por aire} = 0,479 \text{ Kg.}$$

$$\text{C quemado por aire} = 0,479/0,75 = 0,639$$

$$\text{C quemado por aire} = 63,9\% \text{ del C total (30-3)}$$

$$\text{C quemado por vapor} = 0,178 \text{ Kg.}$$

$$\text{C quemado por vapor} = 0,178/0,75 = 0,237$$

$$\text{C quemado por vapor} = 23,7\% \text{ del C total (30-3)}$$

4.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón.

$$\text{P.C.B} = 8100\text{C} + 34000 \cdot (\text{H} - \text{O}/8) + 2200\text{S} - 586 \cdot (9\text{H} + \text{W})$$

$$\text{P.C.B} = 8100 \times 0,75 + 34000 \cdot (0,04 - 0,06/8) + 0 - 586 \cdot (9 \times 0,04 + 0,06)$$

$$= 6934 \text{ Kcal/Kg.}$$

$$\text{P.C.B del gas} = \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4$$

$$\text{P.C.B del gas} = 1,205 \times 3034 + 0,675 \times 2582 + 0,053 \times 8560 = 5853 \text{ Kcal.}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 5853/6934 = 0,844$$

$$\text{P.C.B del gas} = 84,4\% \text{ de la del carbón (30-4)}$$

EJERCICIO N°31 (7)

Un productor de gas es alimentado con una mezcla de 1.2 kilogramos de vapor de agua por cada 10 kilogramos de aire. Solamente son descompuestos 5/6 del vapor.

Del carbono quemado por el aire, 3/4 pasa a CO_2 todo el carbono quemado por el vapor pasa a CO .

Por cada kilogramo de carbón, en la parte superior del productor se destina lo siguiente

$$\begin{array}{ll} \text{CH}_4 = 0.07 \text{ Kg.} & \text{H} = 0.02 \text{ Kg} \\ \text{C}_2\text{H}_4 = 0.06 & \text{CO} = 0.03 \\ \text{C}_6\text{H}_6 = 0.04 & \text{H}_2\text{O} = 0.03 \end{array}$$

El carbon remanente contiene 0.65 kilogramos de carbono y 0.10 kilogramos de residuos.

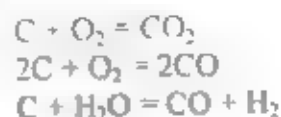
Las cenizas del productor contienen 25% de carbono sin quemar

PREGUNTAS

1. El porcentaje del carbono fijo que es:
 - a. Perdido en las cenizas.
 - b. Quemado por el aire
 - c. Quemado por el vapor.
2. El volumen del gas producido, por kilogramo de carbón
3. La composición (%) del gas en volumen.
4. La cantidad de calor economizado por el uso del vapor, por kilogramo de carbon

SOLUCION

1
Reacciones de combustión:



Cálculo del C que se quema:

$$\begin{aligned} \text{Cenizas (100\%)} &= \text{R (75\%)} + \text{U.C (25\%)} \\ \text{U.C} &= 0.1 \cdot (25/75) = 0.033 \text{ Kg} \\ \text{C quemado} &= 0.65 - 0.033 = 0.617 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Sobre la base de la relación cargada de aire y vapor

$$\text{O del aire} = 10 \times 0.232 = 2.32 \text{ Kg.}$$

Este O pasa a CO y a CO_2

$$\text{Vapor descompuesto} = 1.2 \cdot (5/6) = 1.0 \text{ Kg.}$$

Cálculo del C consumido por el aire

Sea X = C quemado por el aire

$$\text{O del } \text{CO}_2 \text{ del aire} = (1/4) \cdot X \cdot (32/12) = 0.667X \text{ Kg.}$$

$$\text{O del CO del aire} = (3/4) \cdot X \cdot (32/24) = 1.0X \text{ Kg.}$$

$$0.667X + X = 2.32 \text{ Kg.}$$

$$X = 1.392 \text{ Kg.} = \text{C quemado por el aire.}$$

$$\text{C quemado por vapor} = 1 \cdot (12/18) = 0.667 \text{ Kg.}$$

Distribución del C entre vapor y aire

$$1.392 + 0.667 = 2.059$$

$$\text{C para aire} = 0.617 (1.392 / 2.059) = 0.417 \text{ Kg}$$

$$\text{C para vapor} = 0.617 (0.667 / 2.059) = 0.200 \text{ Kg}$$

$$C \text{ perdido en cenizas} = 0,033/0,65 = 0,051$$

$$C \text{ perdido en cenizas} = 5,1\% \text{ del total (31-1.a)}$$

$$C \text{ quemado por aire} = 0,417/0,65 = 0,642$$

$$C \text{ quemado por aire} = 64,2\% \text{ del total (31-1.b)}$$

$$C \text{ quemado por vapor} = 0,2/0,65 = 0,307$$

$$C \text{ quemado por vapor} = 30,7\% \text{ del total (31-1.c)}$$

$$\text{Gas} = \overset{2}{\text{CO}_2} + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_6\text{H}_6$$

Distribución del C del aire

$$C \rightarrow \text{CO}_2 = 0,417 \cdot (1/4) = 0,104 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow \text{CO} = 0,417 \cdot (3/4) = 0,313 \text{ Kg.}$$

Cálculo del gas

$$\text{CO}_2 \text{ del aire} = 0,104 \cdot (22,4/12) = 0,194 \text{ m}^3$$

$$\text{CO del aire} = 0,313 \cdot (11,2/12) = 0,584 \text{ m}^3$$

$$\text{CO del vapor} = 0,2 \cdot (22,4/12) = 0,373 \text{ m}^3$$

$$\text{CO volátil} = 0,03 \cdot (22,4/28) = 0,024 \text{ m}^3$$

$$\text{Total CO} = 0,584 + 0,373 + 0,024 = 0,981 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 \text{ volátil} = 0,02 \cdot (22,4/2) = 0,224 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 \text{ del vapor} = 0,373 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 \text{ total} = 0,224 + 0,373 = 0,597 \text{ m}^3$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 0,2 \cdot (18/12) = 0,3 \text{ Kg. } 83,3\% \text{ del cargado}$$

$$\text{Vapor no descompuesto} = 0,3 \cdot (16,7/83,3) = 0,06 \text{ Kg.}$$

$$\text{Vapor no descompuesto} = 0,06 \cdot (22,4/18) = 0,075 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O volátil} = 0,03 \cdot (22,4/18) = 0,037 \text{ m}^3$$

$$\text{Total H}_2\text{O en gas} = 0,075 + 0,037 = 0,112 \text{ m}^3$$

$$\text{Total vapor cargado} = 0,3 + 0,06 = 0,36 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire cargado} = 0,36 \cdot (10/1,2) = 3,0 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire} = 3/1,293 = 2,32 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 2,32 \cdot 0,79 = 1,833 \text{ m}^3$$

$$\text{CH}_4 = 0,07 \cdot (22,4/16) = 0,098 \text{ m}^3$$

$$\text{C}_2\text{H}_4 = 0,06 \cdot (22,4/28) = 0,048 \text{ m}^3$$

$$\text{C}_6\text{H}_6 = 0,04 \cdot (22,4/78) = 0,011 \text{ m}^3$$

$$\text{Total gas} = 0,194 + 0,981 + 0,597 + 0,112 + 1,833 + 0,098 + 0,048 + 0,011 = 3,874 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido} = 3,874 \text{ m}^3 \text{ (31-2)}$$

3.

Sobre la base de los volúmenes determinados en el punto anterior para c/u de los componentes de la mezcla gaseosa.

Composición del gas (31-3)

CO ₂	5,0%	CO	25,3%
H ₂	15,4	H ₂ O	2,9
N ₂	47,3	CH ₄	2,5
C ₂ H ₄	1,2	C ₆ H ₆	0,3

El calor ahorrado es el aporte del H₂ a la potencia calorífica del gas.

$$\text{Calor ahorrado} = 0,373 \cdot 2582 = 963 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor ahorrado} = 963 \text{ Kcal/Kg. de carbón (31-4)}$$

EJERCICIO N°32 (7)

Un productor de gas Mond es alimentado con una mezcla de aire y vapor, utilizando 2.5 Kg. de vapor por cada kilogramo de carbón consumido
La composición del carbón es la siguiente.

C	62.7%	N	1.4%
O	10.9	H ₂ O	8.6
H	4.6	R	11.8

Las cenizas equivalen al 15.5% del peso del carbón

Asumir que todo el nitrógeno del carbon, aparece en el gas como NH₃. 5% del carbono del carbon pasa al gas como CH₄.

Asumir que todo el oxígeno del carbon se combina con el carbono. 1/2 del carbono pasa a CO y 1/2 a CO₂.

Todo el carbono quemado por el aire y por el vapor también pasa la mitad a CO y la mitad a CO₂.

Del vapor soplado, solamente el 20% se descompone

PREGUNTAS

1. El volumen de aire utilizado, por kilogramo de carbon.
2. El volumen del gas producido, por kilogramo de carbón.
3. El porcentaje de la potencia ca orifica original del carbon que esta disponible en el gas producido (excluyendo el NH₃)

SOLUCION

1.

Cálculo del C que se quema

$$U C = \text{Cenizas} - R$$

$$U C = 0.155 - 0.118 = 0.037 \text{ Kg}$$

$$C \rightarrow CH_4 = 0.627 \times 0.05 = 0.03125 \text{ Kg}$$

$$C \text{ que se quema} = 0.627 - 0.037 - 0.03125 = 0.559 \text{ Kg.}$$

Distribución del C que hace combustión

$$C \rightarrow CO = 0.559/2 = 0.2795 \text{ Kg}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 0.2795 \text{ Kg.}$$

Cálculo del O del aire:

$$O \text{ del } CO = 0.2795 \cdot (16/12) = 0.373 \text{ Kg}$$

$$O \text{ del } CO_2 = 0.2795 \cdot (32/12) = 0.745 \text{ Kg}$$

$$\text{Total O para CO y } CO_2 = 0.373 + 0.745 = 1.118 \text{ Kg}$$

$$\text{Vapor descompuesto} = 2.5 \times 0.2 = 0.5 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ de este} = 0.5 \cdot (16/18) = 0.444 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ del carbon} = 0.109 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ del aire} = 1.118 - 0.444 - 0.109 = 0.565 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire} = 0.565/0.232 = 2.435 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire} = 2.435/1.293 = 1.883 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1.883 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (32-1)}$$

2

$$\text{Gas} = CO_2 + CO + N_2 + H_2 + NH_3 + CH_4 + H_2O$$

Reacciones

- 2) $2C + O_2 = 2CO$
- 3) $C + H_2O = CO + H_2$
- 4) $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$
- 5) $N_2 + 3O_2 = 2NH_3$
- 6) $C + 2H_2 = CH_4$

Cálculo del volumen de los gases, excluyendo el H_2

$$\begin{aligned} CO_2 &= 0,2795 \cdot (22,4/12) = 0,522 \text{ m}^3 \\ CO &= 0,2795 \cdot (22,4/12) = 0,522 \text{ m}^3 \\ NH_3 &= 0,014 \cdot (22,4/14) = 0,022 \text{ m}^3 \\ N_2 &= 1,883 \times 0,79 = 1,488 \text{ m}^3 \\ CH_4 &= 0,03125 \cdot (22,4/12) = 0,058 \text{ m}^3 \\ H_2O &= (0,086 + 2) \cdot (22,4/18) = 2,596 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del H_2 :

Distribución del C combustible:

Sea $X = C$ a combinarse con O del carbón.

$$\begin{aligned} O \text{ del } CO &= (1/2) \times (32/24)X = 0,667X \\ O \text{ del } CO_2 &= (1/2) \times (32/12)X = 1,333X \\ 0,667X + 1,333X &= 0,109 \text{ Kg.} \\ X &= 0,0545 \text{ Kg.} \\ C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2 &= 0,0545/2 = 0,02725 \text{ Kg.} \\ CO \text{ de este } = CO_2 &= 0,02725 \cdot (22,4/12) = 0,051 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Cálculo del C y gases del aire

De acuerdo al análisis anterior $2X$ es la cantidad de C a combinarse con el O del carbón y o también con su equivalente de aire, por tanto:

$$\begin{aligned} 2X &= 0,565 \\ X &= 0,2825 \text{ Kg.} \\ C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2 &= 0,2825/2 = 0,14125 \text{ Kg.} \\ CO = CO_2 \text{ del aire} &= 0,14125 \cdot (22,4/12) = 0,264 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para el H_2O

$$\begin{aligned} C \text{ para } H_2O &= 0,559 - 0,0545 - 0,2825 = 0,222 \text{ Kg.} \\ C \rightarrow CO = C \rightarrow CO_2 &= 0,222/2 = 0,111 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Reacción (3)

$$CO = H_2 = 0,111 \cdot (22,4/12) = 0,2072 \text{ m}^3$$

Reacción (4):

$$\begin{aligned} CO_2 &= 0,111 \cdot (22,4/12) = 0,2072 \text{ m}^3 \\ H_2 &= 0,2072 \times 2 = 0,4144 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Reacción (5)

$$\begin{aligned} NH_3 &= 0,014 \cdot (22,4/14) = 0,022 \text{ m}^3 \\ H_2 &= 0,022 \times 1,5 = 0,033 \text{ m}^3 \\ H_2 \text{ del carbón} &= 0,046 \cdot (22,4/2) = 0,515 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Reacción (6):

$$\begin{aligned} CH_4 &= 0,03125 \cdot (22,4/12) = 0,058 \text{ m}^3 \\ H_2 &= 2 \times 0,058 = 0,116 \text{ m}^3 \\ H_2 \text{ total} &= 0,2072 + 0,4144 + 0,515 + 0,033 + 0,116 = 0,987 \text{ m}^3 \\ Gas &= 0,522 + 0,522 + 1,488 + 0,987 + 0,022 + 0,058 + 2,596 = 6,195 \text{ m}^3 \\ \text{Volumen del gas} &= 6,195 \text{ m}^3/\text{Kg. de carbón (32-2)} \end{aligned}$$

3.

Cálculo de la potencia calorífica del carbón:

$$\begin{aligned} P.C.B. &= 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586(9H + W) \\ P.C.B. &= 8100 \times 0,627 + 34000(0,046 - 0,109/8) + 0 - 586(9 \times 0,046 + 0,086) \\ &= 5886 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Calculo de la potencia calorífica del gas:

$$P.C.B \text{ del gas} = CO + H_2 + CH_4$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,522 \times 3034 + 0,987 \times 2582 + 0,058 \times 8560 = 4628,5 \text{ Kcal}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 4628,5 / 5886 = 0,786$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 78,6\% \text{ de la del carbón (32-3)}$$

EJERCICIO N°33 (9)

Un gas combustible ($CO + H_2$), es producido pasando continuamente oxígeno y vapor de agua a través de un reactor que contiene una cama de coque fluidizada (supóngase C puro)

El coque y el oxígeno se introducen a $77^\circ F$, el vapor a baja presión entra a unos $212^\circ F$

El reactor se mantiene a $1850^\circ F$ controlando la proporción vapor oxígeno, y el gas para la combustión deja el reactor a $1850^\circ F$.

Supóngase que no hay pérdidas de calor del reactor a los alrededores

Supóngase que se completan las reacciones de manera que el gas consiste enteramente de H_2 y CO

PREGUNTAS

1. Calcular la proporción en peso del vapor al oxígeno para la operación, bajo las condiciones descritas

2. ¿Cuál será el análisis del gas para la combustión?

SOLUCION

1
Reacciones de gasificación



Sea X = peso del oxígeno

$$X/32 = 0,03125 X \text{ lb-mol de } O_2$$

Sea Y = Peso del vapor de agua

$$Y/18 = 0,056 Y \text{ lb-mol de } H_2O$$

Cálculo del contenido de calor del vapor de agua al entrar al reactor

Tomando como referencia $77^\circ F$, el contenido de calor a una temperatura t será

$$H_t - H_{77} = \text{BTU/lb-mol}$$

Calor con que entra el vapor de agua $212^\circ F$

Debemos pues calcular para el agua:

$H_{212} - H_{77}$. Para esto, recurrimos a tablas que se encuentran en (9), e interpolamos así:

$$\text{Para } t = 200^\circ F, \quad H_t - H_{77} = 1000 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$\text{Para } t = 400^\circ F, \quad H_t - H_{77} = 2640 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$\text{Interpolando encontramos } H_{212} - H_{77} = 1908,4 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$\text{Calor aportado por el vapor de agua} = 1908,4 (Y/18) = 61,02 Y \text{ BTU}$$

Calculo de los calores de reacción

$$\text{En (1): } CO = (28/16)X \cdot (1/28) = 0,0625 X \text{ lb-mol}$$

$$\text{En (2): } CO = (28/18)Y \cdot (1/28) = 0,056 Y \text{ lb-mol}$$

Las tablas (9) traen los calores de formación a $77^\circ F$:

$$CO = -29,6 \times 1800 = -53800 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$H_2O = -57,8 \times 1800 = -104040 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$\text{Calor de reacción en (1)} = -53800 \times 0,0625X = -3362,5X \text{ BTU}$$

$$\text{Calor de reacción en (2)} = 0,056Y (-53800 + 104040) = 2813,44Y \text{ BTU}$$

Contenido de calor en los gases a 1850°F.
Por interpolación

$$\text{Para el } H_2 = H_{1850} - H_{77} = 12650 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$\text{Para el CO} = H_{1850} - H_{77} = 13450 \text{ "}$$

$$\text{Calor total en CO} = 13450(0,0625X + 0,056Y) = 840,625X + 753,2Y \text{ BTU}$$

$$H_2 = (2/18)(1/2)Y = 0,056 \text{ lb-mol}$$

$$\text{Calor en } H_2 = 12650 \times 0,056Y = 708,4Y \text{ BTU}$$

$$\text{Calor total en gas} = 708,4Y + 753,2Y = 840,625X = 1461,6Y + 840,625X$$

Para que se mantenga el reactor a 1850°F, debemos igualar el calor que entra con el que sale

$$-3362,5X + 2813,44Y - 61,02Y = 1461,6Y + 840,625X$$

$$1290,82Y = 4203,125X$$

$$\text{Relación vapor/O} = Y/X = 4203,125/1290,82 = 3,256,1$$

$$\text{Vapor:O} = 3,256:1 \text{ (33-1)}$$

2

Supongamos ahora que el vapor = 1000 lbs.

$$O = 1000/3,256 = 307,13 \text{ Lbs}$$

$$\text{CO total} = 307,13(359/16) + 1000(359/18) = 26836 \text{ ft}^3$$

$$H_2 = 1000(359/18) = 19944 \text{ ft}^3$$

Análisis del gas (33-2)

$$\text{CO} = 26836 \text{ ft}^3 = 57,37\%$$

$$H_2 = \frac{19944 \text{ ft}^3}{46780 \text{ ft}^3} = 42,63\%$$

$$100,00\%$$

EJERCICIO N°34 (9)

PREGUNTAS

1. ¿Cuál es la composición del gas de aire ideal, producido por gasificación de carbono puro con aire seco, para obtener una mezcla que solo contenga N_2 y CO?
2. ¿Que porcentaje del poder calorífico del carbono original se encuentra representado en el poder calorífico del gas de aire? Dar cuenta del resto del poder calorífico.

SOLUCION

1. Reacción del gas de aire:



Supongamos 100 lbs de C

$$O_2 = 100 \times 0,5 \times 359/12 = 1495,83 \text{ ft}^3$$

Composición del gas de aire ideal (34-1)

$$CO = 1495,83 \times 2 = 2991,67 \text{ ft}^3 = 34,71\%$$

$$N_2 = 1495,83(79/21) = 5627,18 \text{ ft}^3 = 65,29\%$$

$$\text{Gas de aire ideal} = 8618,85 \text{ ft}^3 = 100,00\%$$

2

$$\text{Poder calorífico del C} = 14600 \times 100 = 1'460.000 \text{ BTU}$$

$$\text{Poder calorífico del gas} = 1991,67 \times 341 = 1.020.160 \text{ BTU}$$

$$\text{Poder calorífico del gas} = 1'020.160/1'460.000 = 0,6987$$

$$\text{Poder calorífico del gas} = 69,87\% \text{ del de C (34-2)}$$

El resto del poder calorífico del C (=30,13%) representa pérdidas en el horno y el calor arrastrado por el CO y el diluyente N_2

EJERCICIO N°35 (9)

El análisis de un gas pobre es el siguiente

N ₂	50%	CO	25%
H ₂	18	CO ₂	6
O ₂	1		

PREGUNTAS

1. Calcular el poder calorífico neto, BTU/ft³ (seco a C.N)
2. El poder calorífico neto, Kcal/m³ (seco a C.N)
3. El poder calorífico bruto, BTU/ft³ (60°F, 30 in-Hg; saturado).

SOLUCION

1

Para este cálculo, ver la Tabla L del Apéndice:

Para 1 ft³

$$P.C.B \text{ del gas} = CO + H_2$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,25 \times 341 + 0,18 \times 290 = 137,45 \text{ BTU/ft}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 137,45 \text{ BTU/ft}^3 \text{ (35-1)}$$

2

Para 1 m³

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,25 \times 3034 + 0,18 \times 2582 = 1233,26 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 1233,26 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (35-2)}$$

$$T = 60^\circ\text{F} = 15,6^\circ\text{C}$$

$$P = 30 \text{ in-Hg} = 762 \text{ mm-Hg}$$

Ver Tabla XXIV del Apéndice

$$\text{Presión de saturación del agua a } 15,6^\circ\text{C} = 0,52 \text{ in} = 13,21 \text{ mm-Hg}$$

$$H_2O = 100 - (13,21/762) = 1,73\%$$

$$\text{Gas seco} = 100 - 1,73 = 98,27\%$$

Cambio de composición del gas

$$N_2 = 0,5 \times 98,27 = 49,135\%$$

$$CO = 0,25 \times 98,27 = 24,568\%$$

$$H_2 = 0,18 \times 98,27 = 17,689\%$$

$$CO_2 = 0,06 \times 98,27 = 5,896\%$$

$$O_2 = 0,01 \times 98,27 = 0,983\%$$

En la Tabla L se advierte que para obtener la potencia calorífica bruta (P.C.A) de los gases, se adiciona 471 Kcal/m³ o 53 BTU/ft³ por cada mol de H₂ en el gas

Dado que la composición el volumen es molar también tendríamos 0,17689 moles de H₂

$$P.C.A = 0,17689 \times (290 + 53) + 0,24568 \times 341 = 144,45 \text{ BTU/ft}^3$$

$$P.C.A = 144,45 \text{ BTU/ft}^3 \text{ (35-3)}$$

EJERCICIO N°36 (9)

PREGUNTAS

1. ¿Qué porcentaje del poder calorífico del carbono está representado en el gas de agua ideal (50%CO - 50%H₂), producido por gasificación de carbono puro? Explicar el hecho de que el valor térmico total del gas es mayor que el del carbono original.

SOLUCION

1.
Reacción del gas de agua.



Asumimos 100 Kg. de C puro.

$$H_2 = CO = 100 \cdot (22,4/12) = 186,67 \text{ m}^3$$

$$\text{P.C.B. del C} = 100 \times 8100 = 810000 \text{ Kcal}$$

$$\text{P.C.B. del gas} = 186,67 \times (3034 + 2582) = 1'048.339 \text{ Kcal.}$$

$$\text{P.C.B. del gas} = 1'048.339/810000 = 0,12942$$

$$\text{P.C.B. del gas} = 129,42\% \text{ del de C (36-1)}$$

El valor térmico del gas de agua ideal excede el del carbono original, por el hecho de que esta reacción es endotérmica para poder descomponer el agua y todo el calor de exceso lo absorben los productos de combustión (H₂ y CO) que son combustibles y no contienen diluyentes.

EJERCICIO N°37 (9)

Un gas pobre (ideal) producido por carbono puro, aire y agua podría caracterizarse de la manera siguiente:

- Las reacciones de gasificación se completan, por lo que el gas pobre consiste únicamente de N₂, H₂ y CO.
- Los materiales de entrada y los de salida no contienen calor sensible (esto es, todos están a 77°F), y
- El proceso es adiabático.

Para este proceso ideal

PREGUNTAS

- Calcular la proporción del vapor, libras por libra de carbono.
- Calcular el gas producido, en pies cúbicos (C.N.) por libra de carbono.
- La composición del gas.
- El poder calorífico del gas. B.T.U. ft³. Comparar estos resultados con los datos para gasógenos comerciales y gases pobres.

SOLUCION

1.
Reacciones de gasificación para la producción del gas pobre:

- $C + O_2 = CO_2$
- $CO_2 + C = 2CO$
- $C + H_2O = H_2 + CO$
- $3C + O_2 + H_2O = H_2 + 3CO$

Partiendo de 1 libra de C

$$\text{Vapor de H}_2\text{O} = 1 \times (18/3 \times 12) = 0,5 \text{ lbs}$$

$$\text{Vapor de H}_2\text{O} = 0,5 \text{ lbs./lb. de C (37-1)}$$

Sobre la base de la reacción (d):

$$\text{O}_2 = 1 \cdot (359/3 \times 12) = 9,972 \text{ ft}^3$$

Gas pobre producido a C.N/lb. de C (37-2)

$$\text{N}_2 = 9,972 \cdot (79/21) = 37,514 \text{ ft}^3 = 48,47\%$$

$$\text{CO} = 9,972 \times 3 = 29,916 \text{ ft}^3 = 38,65\%$$

$$\text{H}_2 = 9,972 \times 1 = 9,972 \text{ ft}^3 = 12,88\%$$

$$77,402 \text{ ft}^3 = 100,00\%$$

La composición del gas es (37-3)

$$\text{N}_2 = 48,47\%$$

$$\text{CO} = 38,65\%$$

$$\text{H}_2 = 12,88\%$$

$$100,00\%$$

$$\text{P.C.B del gas} = \text{CO} + \text{H}_2$$

$$\text{P.C.B del gas} = 0,3865 \times 341 + 0,1288 \times 290 = 169,15 \text{ BTU/lb}$$

$$\text{P.C.B del gas} = 169,15 \text{ BTU/ft}^3 \text{ (37-4)}$$

El calor total sería

$$\text{P.C.B del gas} = 169,15 \times 77,402 = 13092,43 \text{ ft}^3$$

Para gasógenos comerciales (9), pag. 114

Proporción de vapor = 0,2 a 1 lb/lb de C

Producción de gas = 55 a 88 ft³/lb de C

Dado que en nuestro caso la proporción de vapor es 0,5 lb/lb de C podemos sacar un promedio

para el gasógeno comercial

$$\text{Producción de gas} = (55 + 88)/2 = 71,5 \text{ ft}^3/\text{lb de C}$$

$$\text{P.C.B., gasogeno} = 169,15 \times 71,5 = 2094,23 \text{ BTU} \text{ menor que la ideal}$$

EJERCICIO N°38 (9)

PREGUNTAS

Repetir los calculos del ejercicio n° 37 para un gasogeno ideal alimentado con carbono puro, oxígeno y vapor.

SOLUCION

La reacción (d) del ejercicio anterior sigue siendo la misma, solo que esta vez no se alimenta aire, sino oxígeno puro y por tanto en el gas no habrá N₂

Para 1 libra de C

$$\text{Vapor} = 1 \times 18/3 \times 12 = 0,5$$

$$\text{Vapor} = 0,5 \text{ lbs./lb. de C (38-1)}$$

2.
Sobre la base de la reacción (d)

$$H_2 = 9,972 \text{ ft}^3$$

$$CO = 29,916 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas producido} = 9,972 + 29,916 = 39,888 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas producido a C.N} = 39,888 \text{ ft}^3/\text{lb. de C (38-2)}$$

3.

Composición del gas (38-3)

$$CO = 29,916 \text{ ft}^3 = 75\%$$

$$H_2 = \frac{9,972 \text{ ft}^3}{39,888 \text{ ft}^3} = \frac{25\%}{100\%}$$

4.

$$\text{P.C.B del gas} = 0,75 \times 341 + 0,25 \times 290 = 328,25 \text{ BTU/ft}^3$$

$$\text{P.C.B del gas} = 328,25 \text{ BTU/ft}^3 \text{ (38-4)}$$

Como el promedio del gas producido por libra de C fue calculado en $71,5 \text{ ft}^3$ para el gasógeno comercial, se puede observar que es casi el doble del producido en este caso, $39,888 \text{ ft}^3$, pero la potencia calorífica es mucho mayor cuando se utiliza oxígeno puro, por no contener gases diluyentes.

CAPITULO VI
TERMOQUIMICA Y TERMOFISICA

EJERCICIO N°1 (7)

PREGUNTAS

Calcular el calor de reacción para cada una de las reacciones que se mencionan a continuación (colocar el signo apropiado, más o menos, antes de cada valor, para el CO y CO₂ utilizar los valores para carbono amorfo)

1. $2\text{FeS} + 3\text{O}_2 = 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2$
2. $4\text{Fe}_2\text{O}_3 + 9\text{C} = 8\text{Fe} + 6\text{CO} + 3\text{CO}_2$
3. $\text{ZnO} + \text{C} = \text{Zn} + \text{CO}$
4. a) $\text{PbS} + 2\text{PbO} = 3\text{Pb} + \text{SO}_2$
 b) $\text{PbS} + \text{PbSO}_4 = 2\text{Pb} + 2\text{SO}_2$
 c) $2\text{PbS} + 2\text{PbO} = \text{PbSO}_4 + 5\text{Pb} + 3\text{SO}_2$
5. a) $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$
 b) $4\text{CuFeS}_2 + 13\text{O}_2 = 4\text{CuO} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$

SOLUCION

El calor de reacción es el calor desarrollado (producido) o absorbido durante una reacción química, y puede ser calculado a partir de los calores de formación de los compuestos involucrados en la reacción (7).

En termodinámica se acostumbra a pensar en términos del contenido de energía del sistema original; el calor desarrollado en una reacción representa un decrecimiento en la energía poseída por el sistema original (reactivos), por tanto, el calor desarrollado lleva signo negativo.

El cambio en el contenido de energía o cambio de entalpía de un sistema, representado por el calor desarrollado o absorbido, se representa por el símbolo ΔH .

Cuando el calor es desarrollado o producido (reacción exotérmica), ΔH es negativo; cuando el calor es absorbido por el sistema (reacción endotérmica), ΔH es positivo.

En una reacción química debe cumplirse:

$$\Delta H = \sum \Delta H \text{ productos} - \sum \Delta H \text{ reactivos} \quad (1)$$

El ΔH para los productos o los reactivos representa el calor de formación de los respectivos compuestos y para el estudio de las reacciones propuestas, estos valores se encuentran en las tablas XI II, XI VII y XI VI de. Apéndice. Para los elementos puros, este valor se toma como cero.

1



Calores de formación

FeS =	- 23100 Kcal/mol
FeO =	- 64300 "
SO ₂ (g) =	- 70940 "
O ₂ =	0

Aplicando la ecuación (1)

$$\Delta H = -2 \times 70940 - 2 \times 64300 - (-2 \times 23100) = -224280 \text{ Kcal}$$

Calor de reacción = - 224280 Kcal (1-1)

2



Calores de formacion



Con C amorfo



Aplicando la ecuacion (1)

$$\Delta H = -3 \times 97200 - 6 \times 29100 + 4 \times 198500 = +327440 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reaccion} = +327440 \text{ Kcal (1-2)}$$

3



Calor de formacion del ZnO = -83500 Kcal/mol

$$\Delta H = -29160 + 83500 = +54500 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reaccion} = +54500 \text{ Kcal (1-3)}$$

4

Calores de formacion



$$\Delta H = -70940 + 2 \times 52500 + 22200 = +56260 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reaccion} = +56260 \text{ kcal (1-4.a)}$$



$$\Delta H = -2 \times 70940 + 218500 + 22200 = +98820 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reaccion} = +98820 \text{ Kcal (1-4.b)}$$



$$\Delta H = -3 \times 70940 + 2 \times 22200 + 2 \times 52500 + 218500 = +155080 \text{ Kcal}$$

Como esta reaccion es el resultado de sumar (a) + (b) el calor de reaccion tambien se obtiene de la misma manera

$$\Delta H(c) = \Delta H(a) + \Delta H(b)$$

$$\Delta H(c) = 56260 + 98820 = 155080 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reaccion} = 155080 \text{ Kcal (1-4.c)}$$

5

Calores de formacion



$$\Delta H = -8 \times 70940 - 2 \times 198500 + 4 \times 35500 = -822520 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reaccion} = -822520 \text{ Kcal (1-5.a)}$$



$$\Delta H = -8 \times 70940 - 2 \times 198500 - 4 \times 38500 + 4 \times 40130 = -958000 \text{ Kcal}$$

Calor de reacción = - 958000 Kcal (1-5.b)

EJERCICIO N°2 (7)

PREGUNTAS

1. Con el uso de las tablas de Apéndice, obtener los siguientes calores de formación (l.e., Si, O₂), (FeO, SiO₂) y (Si, O₂).
2. Escribir cada una en la forma de una ecuación química.
3. A partir de estas ecuaciones, determinar el calor de formación del FeO, por kilogramo de l.e.

SOLUCION

La Tabla XLIV (A) del Apéndice presenta:

$$(\text{Fe, Si, O}_2) \Delta H = -273500 \text{ Kcal/mol (a partir de sus elementos)}$$

Calor de formación = - 273500 Kcal/mol (2-1)

La Tabla XLIV (B.) del Apéndice presenta:

$$(\text{FeO, SiO}_2) \Delta H = -8200 \text{ Kcal/mol (a partir de los oxidos constituyentes)}$$

Calor de formación = - 8200 Kcal/mol (2-1)

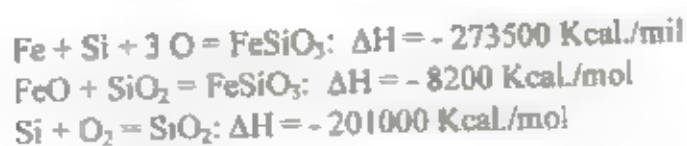
La Tabla XLII del Apéndice presenta

$$(\text{Si, O}_2) \Delta H = -201000 \text{ Kcal/mol (a partir de sus elementos)}$$

Calor de formación = - 201000 Kcal/mol (2-1)

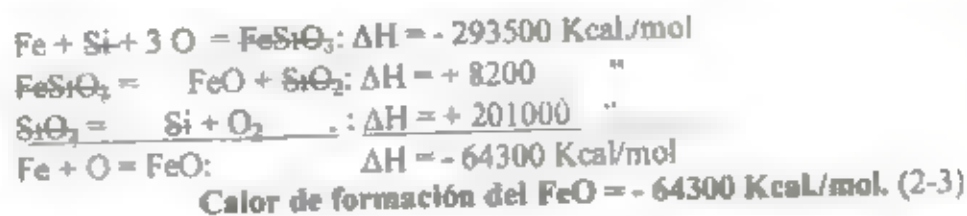
2

En la forma de ecuaciones termodinámicas tendríamos (2-2)



3

Es necesario advertir que cuando se invierte el sentido de una reacción el calor involucrado en ella cambia de signo, por lo tanto, para encontrar el calor de formación del FeO a partir de sus elementos, vamos a escribir las reacciones anteriores de la siguiente manera



Los compuestos similares que se encuentran en igual cantidad pero en lados opuestos de signo igual se cancelan, hasta obtener una reacción final.

El calor de formación será la suma aritmética de los correspondientes a cada reacción

Si se observa la Tabla XLII del Apéndice, se puede ver que el valor calculado para el FeO coincide con el tabulado.

EJERCICIO N°3 (7)

PREGUNTAS

1. Dados los siguientes calores de formación encontrados en las tablas del Apéndice, calcular el calor de oxidación de la plata a Ag_2O , por kilogramo de plata



2. dados los siguientes calores de reacción ($-\Delta H$)



Calcular el calor de formación molar del MnSO_4 , a partir de MnO y SO_3

SOLUCION

1

Vamos a ordenar los datos de que disponemos en términos de reacciones termodinámicas



Si invertimos el sentido de las reacciones (a) y (c), y multiplicamos la (b) por 2, tendremos



Sumando algebraicamente: $2\text{Ag} + \text{O} = \text{Ag}_2\text{O}$

$$\Delta H = +46100 - 2 \times 29400 - 600 = -13300 \text{ Kcal}$$

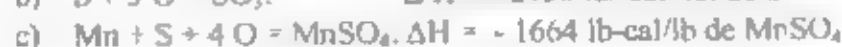
Peso atómico de la plata = 107,9

$$\Delta H = 13300 / 2 \times 107,9 = 61,6 \text{ Kcal/Kg. de Ag.}$$

$$\Delta H = 61,6 \text{ Kcal/Kg. de Ag. (3-1)}$$

2

Ordenamiento de los datos termodinamicamente



Organizamos las reacciones para obtener lo requerido



La reacción (d) es el resultado de la cancelación de términos similares en lados opuestos del signo de igualdad, para después sumar los que no se pudieron cancelar colocándolos en su misma posición respecto de este signo

Pesos atómicos: S = 32, Mn = 55
 Pesos moleculares: $MnSO_4 = 151$

$$\Delta H = \sum \Delta H_f \text{ productos} - \sum \Delta H_f \text{ reactivos}$$

$$\Delta H = (-1664 \times 151 - 1757 \times 55 - 2930 \times 32) / 151 = 2925$$

$$\text{Calor de formación} = 2925 \text{ lb-cal/mol de } MnSO_4 \text{ (3-2)}$$

EJERCICIO N°4 (7)

PREGUNTAS

1. Un mineral de antimonio que contiene 27% de Sb_2S_3 es tostado, produciendo Sb_2O_3 y SO_2 . El peso del mineral tratado es de 5000 libras.

Se requiere:

- El volumen de aire requerido, en pies cúbicos.
- La cantidad de calor desarrollado, en libras-calorías.

2. Un horno eléctrico es utilizado para manufacturar bisulfuro de carbono gaseoso, a través de la reacción del carbono con el azufre. La producción es de 7 toneladas métricas en 24 horas.

Se requiere:

- La cantidad total de energía desarrollada o requerida (cual?) en la reacción, en kilocalorías.
- La potencia o energía en kilovatios.

SOLUCION

a)

Pesos atómicos: Sb = 121,8; S = 32; O = 16

Pesos moleculares: $Sb_2S_3 = 339,6$, $Sb_2O_3 = 291,6$, $SO_2 = 64$

Reacción de tostación:



$$Sb_2S_3 = 5000 \times 0,27 = 1350 \text{ lbs.}$$

$$O_2 = 2350 - (4,5 \times 32 \times 1350 / 339,6) = 6422 \text{ ft}^3$$

$$\text{Oxígeno requerido} = 6422 \text{ ft}^3 \text{ (4-1.a)}$$

b)

Las tablas XLII y XLVII del Apéndice presentan los siguientes datos para los calores de formación:

$$Sb_2S_3: \Delta H = -36000 \text{ lbs-cal/lb-mol}$$

$$SO_2: \Delta H = -70940 \text{ "}$$

$$Sb_2O_3: \Delta H = -165800 \text{ "}$$

Cálculo de los pesos:

$$SO_2 = 1350 (3 \times 64 / 339,6) = 763,25 \text{ lbs.}$$

$$Sb_2O_3 = 1350 (291,6 / 339,6) = 1159,19 \text{ lbs.}$$

Dado que el calor de formación viene expresado en lbs-cal/peso fórmula (= lbs-cal/lb-mol), para calcular el calor evolucionado en la reacción se procede así:

$$\Delta H = \Delta H_f SO_2 + \Delta H_f Sb_2O_3 - \Delta H_f Sb_2S_3$$

$$\Delta H = -70940 (763,25 / 64) - 165800 (1159,19 / 291,6) + 36000 (1350 / 339,6) = 1'362.006$$

$$\Delta H = 1'362.006 \text{ lbs-cal (4-1.b)}$$

Peso molecular $C = 12$, $S = 32$

Calor de formación del $CS_2(g) = + 22000 \text{ Kcal./mol}$

Reaccion

$C + S_2 = CS_2(g)$; $\Delta H = + 22000 \text{ Kcal./mol}$

$$\Delta H = 22000 \cdot (7000/76) = 2'026.315.8 \text{ Kcal}$$

Como ΔH tiene signo (+), quiere decir que la reacción es endotérmica, es decir, requiere calor para llevarse a cabo

Calor total = + 2'026.316 Kcal., requerido (4-2.a)

b)

1 Kcal. = 0,001163 Kw-hr

El calor total encontrado en el numeral anterior, se refiere a 24 horas de operación

$$\text{Energía} = 2'026.315,8 (\text{Kcal./24hr}) \times (0,001163 \text{ Kw-hr/1 Kcal}) = 98,2 \text{ Kw}$$

Energía = 98,2 Kw (4-2.b)

EJERCICIO N°5 (7)

Un horno eléctrico es alimentado con CaO y C en las proporciones adecuadas para producir CaC_2 , de acuerdo a la reacción



Se producen 0,25 kilogramos de CaC_2 por kilovatio-hora. El CaC_2 reacciona con agua de acuerdo a la siguiente reacción



PREGUNTAS

1. La energía mínima requerida para producir una tonelada de CaC_2 por hora
2. La eficiencia energética electrotérmica para la operación del horno
3. Si 100 gramos de CaC_2 se trataran con 10 kilogramos de agua, cuantas calorías serian liberadas, y cuantos grados de elevación de temperatura resultarían?

SOLUCION

1

Calores de formación

CaC_2 : $\Delta H = - 14600 \text{ Kcal./mol}$

CO : $\Delta H = - 29100 \text{ "}$

CaO : $\Delta H = - 151600 \text{ "}$

Cálculo del número de moles

$CaC_2 = 1000 \text{ Kg.} = 1000/64 = 15,625 \text{ moles.}$

$CaO = 1000 (56/64) = 875 \text{ Kg.} = 15,625 \text{ moles}$

$CO = 1000 \cdot (28/64) = 437,5 \text{ Kg.} = 15,625 \text{ moles}$

$$\Delta H = 15,625 (- 14600 - 29160 + 151600) = 1'685.500 \text{ Kcal./hr}$$

1 Kw = 860 Kcal./hr

$$\text{Energía} = 1'685.000 (\text{Kcal./hr}) \times (\text{Kw}/860 \text{ Kcal./hr}) = 1959,3 \text{ Kw}$$

Energía mínima requerida = 1959,3 Kw (5-1)

Si se utiliza 1 Kw-hr para producir 0,25 Kg. de CaC_2 , la energía total para producir 100 Kg. hr será

$$\text{Energía total} = 1000/0,25 = 4000 \text{ Kw}$$

$$\text{Eficiencia} = 1959,3/4000 = 0,4898$$

$$\text{Eficiencia electrotérmica} = 49,0\% \text{ (5-2)}$$

En este caso, utilizaremos la reacción



$$\text{CaC}_2 = 100/64 = 1,5625 \text{ moles.}$$

$$\text{H}_2\text{O consumida} = 100 \cdot (2 \times 18/64) = 56,25 \text{ g} = 3,125 \text{ moles.}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 \text{ producido} = 100 \cdot (74/64) = 115,625 \text{ g.} = 1,5625 \text{ moles}$$

$$\text{C}_2\text{H}_2 \text{ producido} = 100 \cdot (26/64) = 40,625 \text{ g.} = 1,5625 \text{ moles.}$$

Dado que se consume mucho menos agua de la que se cargo, esto indica que los productos quedaran en solución, por tanto, en las tablas del apéndice, los respectivos calores de formación para estos productos se buscarán en la columna "Solución Diluida":

$$\Delta H = \Delta H_f \text{Ca(OH)}_2 + \Delta H_f \text{C}_2\text{H}_2 - \Delta H_f \text{H}_2\text{O} - \Delta H_f \text{CaC}_2$$

$$\Delta H = 1,5625 \times 49900 - 1,5625 \times 238800 + 3,125 \times 68370 - 1,5625 \times 14600 = -58688 \text{ cal}$$

$$\text{Calorías liberadas} = 58688 \text{ (5-3)}$$

Para el cálculo de la elevación de temperatura, utilizaremos la ecuación siguiente

$$Q = W \times C_m \times t \quad (2)$$

Q = contenido de calor de un cuerpo por encima de 0°C

W = cantidad del cuerpo.

t = temperatura ($^\circ\text{C}$)

C_m = calor específico, entre 0 y $t^\circ\text{C}$

Productos de la reacción

$$\text{H}_2\text{O} = 10000 - 56,25 = 9943,75 \text{ g.}$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 115,625 \text{ g.}$$

$$\text{C}_2\text{H}_2 = 40,625 \cdot (22,4/26) = 35 \text{ cm}^3 = 0,035 \text{ lts.}$$

Calores específicos

Tabla XIX

Para $\text{Ca(OH)}_2 = 0,274$

Tabla XV, para C_2H_2 y H_2O :

$$\text{C}_2\text{H}_2 = 0,20 \cdot (x+1) + 1,35 \times 10^{-4} (x+2) \cdot t, \text{ por volumen}$$

X = # de átomos de C, entonces, para

$$\text{C}_2\text{H}_2 = 0,20 \cdot (2+1) + 1,35 \times 10^{-4} \cdot (2+2) \cdot t = 0,6 + 5,4 \times 10^{-4} \cdot t$$

$$\text{Para H}_2\text{O} = 0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \cdot t$$

Contenido de calor en los productos a cualquier temperatura

$$\text{H}_2\text{O} = 9943,75 \cdot (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \cdot t) \cdot t =$$

$$\text{Ca(OH)}_2 = 115,625 \cdot 0,274 \cdot t =$$

$$\text{C}_2\text{H}_2 = 0,035 \cdot (0,6 + 5,4 \times 10^{-4} \cdot t) \cdot t =$$

$$\text{Total contenido de calor} = \frac{4635,6 \cdot t + 0,6165 \cdot t^2}{}$$

Hay que recordar que la eficiencia del horno es del 49% y que el resto son pérdidas, por tanto, el calor que va a efectuar el calentamiento de los productos es

$$58688 \times 0,49 = 28757,12 \text{ cal.}$$

$$28757,12 = 4635,6 t + 0,6165 t^2 \therefore t = 6,2^\circ\text{C}$$

$$\text{Calentamiento producido} = 6,2^\circ\text{C} \text{ (5-3)}$$

EJERCICIO N°6 (7)

PREGUNTAS

1. Calcular el contenido de calor (por encima de 0°C) de 15 kilogramos de estaño
 - a) Sólido, justo en el punto de fusión
 - b) Fundido, justo en el punto de fusión.
 - c) A una temperatura de 1200°C
2. Calcular el contenido de calor de una mol de vapor de silicio a 3700°C (la temperatura del arco eléctrico entre electrodos de carbono)

SOLUCION

1

a)

La Tabla XIV del Apéndice, presenta los siguientes datos para el estaño:

Temperatura de fusión = 232°C

C_s (estado sólido) = $0,0534 + 1,74 \times 10^{-5} t$ (Kcal/Kg)

Q_{LMP} = contenido total de calor del líquido en su punto de fusión = 27,8 Kcal/Kg

C = calor específico en el estado líquido = 0,055 Kcal/Kg

$$Q_s \text{ sólido} = 15 \cdot (0,0534 + 1,74 \times 10^{-5} \times 232) \times 232 = 200 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en estado sólido en su punto de fusión = 200 Kcal. (6-1 a)

b)

$$Q_l \text{ líquido} = 27,8 \times 15 = 417 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor en estado líquido en su punto de fusión = 417 Kcal. (6-1 b)

c)

$$Q_l \text{ a } 1200^\circ\text{C} = 27,8 \times 15 + 15 \times 0,055 \times (1200 - 232) = 1516 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor del Sn, a 1200°C = 1516 Kcal (6-1.c)

2.

La tabla XIV del Apéndice, presenta los datos siguientes para el silicio.

Peso atómico = 28,06

T_b = temperatura de ebullición = 2290°C

Q_{VBP} = contenido total de calor del vapor en su punto de ebullición, partiendo de 0°C = 2170 Kcal/Kg.

C = calor específico del vapor = 0,13

$$Q_v \text{ a } 3700^\circ\text{C} = 28,06 \times 2170 + 28,06 \times 0,13 (3700 - 2290) = 66034 \text{ kcal}$$

Contenido de vapor del Si, a 3700°C = 66034 kcal. (6-2)

EJERCICIO N°7 (7)

Un horno a carbon fue utilizado para fundir cátodos de cobre y necesitó 7 horas para fundir 160 toneladas métricas de cobre

La potencia calorífica del carbon utilizado fue de 9952 kilocalorías por kilogramo

Se utilizaron 250 kilogramos de carbon, por tonelada de cobre fundido

La capacidad calorífica de los gases al quemar 1 kilogramo de carbon es 407, - 0.000669 t

El horno esta equipado con una caldera para perdidas de calor la temperatura de los gases a la entrada a la caldera es de 1100°C y a la salida de la misma de 500°C

PREGUNTAS

1. La cantidad de calor requerido para fundir el cobre
2. La eficiencia térmica del horno durante la fusión
3. Los caballos caldera desarrollados por la caldera, asumiendo que esta utiliza el 91% calor dejado por los gases que pasan a través de ella.

SOLUCION

1

Datos para el cobre

Temperatura de fusión = 1084°C

Calor latente de fusión = $41,8 \text{ Kcal Kg}$

C_{m} estado sólido = $0,092 + 1,25 \times 10^{-5} t$

Q , a 1084°C = $160000 \times (0,092 + 1,25 \times 10^{-5} \times 1084) \times 1084 = 18'306.592 \text{ Kcal}$

Calor latente de fusión = $160000 \times 41,8 = \underline{6'688.000 \text{ Kcal}}$

Calor requerido para la fusión = $24'994.592 \text{ Kcal}$

Calor requerido para fundir el Cu = $25'000.000 \text{ Kcal}$ (7-1)

2

Calor total suministrado al horno = $5952 \times 160 \times 250 = 238'080.000 \text{ Kcal}$

Calor utilizado en la fusión = $25'000.000 \text{ Kcal}$

Eficiencia térmica = $25'000.000 / 238'080.000 = 0,105$

Eficiencia térmica = $10,5\%$ (7-2)

3

Carbon = $250 \times 160 = 40000 \text{ Kg}$

Q , en gases al entrar a la caldera = $40000 \times (4,071 + 0,000669 \times 1100) \times 1100$
 $211'503.600 \text{ Kcal}$

Q , en gases al salir de la caldera = $40000 \times (4,071 + 0,000669 \times 500) \times 500$
 $= 88'110.000 \text{ Kcal}$

Q , dejado por los gases en la caldera = $211'503.600 - 88'110.000 = 123'393.600 \text{ Kcal}$

Q , utilizado = $123'393.600 \times 0,94 = 115'989.984 \text{ Kcal}$

Q , utilizado = $115'989.984 / 7 = 16'569.998 \text{ Kcal/hr}$

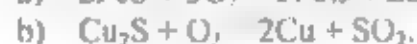
1 caballo - caldera = 8.440 Kcal/hr

Caballo - caldera = $16'569.998 / 8.440 = 1963,3$

Caballos - caldera desarrollados = $1963,3$ (7-3)

EJERCICIO N°8 (7)

En la conversión de la mata de cobre, la acción química en cada una de las dos etapas está representada por las siguientes reacciones:



Assume que la temperatura promedio en el convertidor durante la primera etapa es de 100°C , y durante la segunda es de 1200°C .

El aire sin embargo es soplado frío, asumir que su temperatura es de 0°C

PREGUNTAS

Calcular para la reacción solamente, despreciando el nitrógeno, el cual no aparece en la

- 1100°C
- 1200°C
- 1 El calor para la reacción (a), estando todos los componentes excepto el oxígeno a 1100°C
 - 2 Lo mismo para la reacción (b), estando todos los componentes excepto el oxígeno a 1200°C

SOLUCION

En este caso se trata de calcular el calor de una reacción a altas temperaturas, para realizar lo cual se suma el contenido de calor de los reactivos y se sustrae el contenido de calor de los productos al calor desarrollado en la reacción a temperatura ambiente

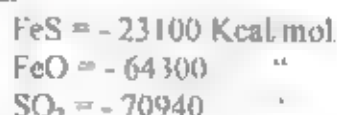
Las cifras sobre los valores de los calores de formación, son a temperatura ambiente (18°C), pero para la mayoría de los propósitos, el calor de reacción así calculado puede ser considerado como igual para 0°C

En las Tablas del Apéndice se consiguen los datos que se utilizan en este ejercicio:

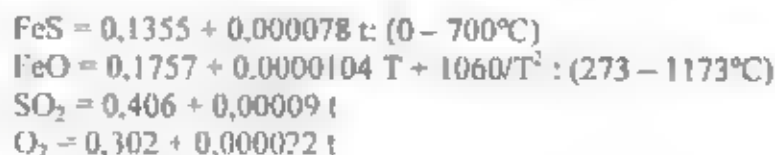
Reacción (a)



Calores de formación para:



Calores específicos de



El calor de reacción a temperatura ambiente

$$\Delta H = -2 \times 70940 - 2 \times 64300 + 2 \times 23100 = -224280 \text{ Kcal.}$$

No se utilizan los calores latentes de fusión puesto que las respectivas temperaturas de fusión son: FeS (1195°C) y FeO (1380°C)

Contenido de calor a 1100°C:

Reactivos:

Para el FeS (peso molecular = 88)

$$Q, \text{FeS} = 2 \times 88 \times (0,1355 + 7,8 \times 10^{-5} \times 1100) \times 1100 = 42843,68 \text{ Kcal.}$$

El oxígeno se considera a 0°C

Productos:

Como el calor específico del FeO (peso molecular = 72) se presenta en el rango (273 - 1173°C), por instrucciones dadas en la Tabla XIX, procedemos en el cálculo así

$$Q, \text{FeO} (273\text{K}) = 144 \times (0,1757 + 1,04 \times 10^{-5} \times 273 + 1060/273^2) = 7578,38 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{FeO} (1100^\circ\text{C} = 1373\text{K}) = 37872,34 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{FeO} \text{ neto} = 37872,34 - 7578,38 = 30093,94 \text{ Kcal}$$

Para el SO₂ (= 2x22,4 = 44,8 lts.):

$$Q, \text{SO}_2 = 44,8 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1100) \times 1100 = 24886,4 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{total en productos} = 30093,94 + 24886,4 = 54980,36 \text{ Kcal}$$

Se asume un signo (-) para los reactivos debido a que el calor desarrollado a temperatura ambiente tiene este signo también

$$\Delta H (1100^\circ\text{C}) = -224280 - 42843,68 + 54980,36 = -212843,32 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reacción} = -212843,32 \text{ Kcal (8 - 1.a)}$$

Productos

$$\begin{aligned} \text{CO} &= 2.2 \times 10^{-5} \times 1700 \times 1700 = 25849 \text{ Kcal} \\ \text{SiC} &= 40(0.222 + 3.63 \times 10^{-5} \times 1973 + 7090.1973) \times 1973 = 3571 \text{ Kcal} \\ \text{SiC} &= 40(0.222 + 3.63 \times 10^{-5} \times 1973 + 7090.1973) \times 1973 = 23316 \text{ Kcal} \\ \text{Contenido neto de calor del SiC} &= 23316 - 3571 \\ \text{Total productos} &= 19745 \text{ Kcal} \\ &= 45594 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\Delta H_{1700^\circ\text{C}} = 119320 + 45594 - 56201 = 108713 \text{ kcal}$$

$$\text{Calor de reacción a } 1700^\circ\text{C} = 108713 \text{ kcal (9-1)}$$

2 a.

Reacción



$$\text{A } 2000^\circ\text{F} = 1903.3^\circ\text{C}$$

Lo primero que hay que hacer es calcular las cantidades correspondientes a 1 libra de Fe

$$\text{Fe}_3\text{C} = 1 \times (180/3 \times 56) = 1.071 \text{ lbs}$$

$$\text{C} = 1 \times (12/3 \times 56) = 0.071 \text{ lbs.}$$

El calor de formación del Fe_3C por libra de Fe = 31 Kcal

$$\Delta H_{\text{reacción temperatura ambiente}} = 0 + 0 - 31 = -31 \text{ Kcal}$$

Calores específicos (Kcal./Kg.)

$$\text{C} = 0.372 \text{ (0 - } 1200^\circ\text{C)}$$

$$\text{Fe} = 0.150 \text{ (0 - } 1200^\circ\text{C)}$$

Para hacer la conversión de Kcal/kg \rightarrow Kcal/lb, se utiliza el factor 0.4536

Contenido de calor en los productos a 1093.3°C :

$$\text{C} = 0.071 \times 0.4536 \times 0.372 \times 1093.3 = 13.1 \text{ Kcal}$$

$$\text{Fe} = 1 \times 0.4536 \times 0.150 \times 1093.3 = 87.5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Contenido de calor en productos} = 87.5 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en reactivos:

$$\text{Fe}_3\text{C} = 1.071 \times 0.4536 \times (0.14 + 6.2 \times 10^{-5} \times 1093.3) \times 1093.3 = 110.4 \text{ Kcal}$$

$$\Delta H_{1093.3} = -31 + 87.5 - 110.4 = -53.9 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reacción a } 1093.3^\circ\text{C} = -54 \text{ Kcal (9-2 a)}$$

2 b

$$\text{A } 4000^\circ\text{F} = 2204.4^\circ\text{C}$$

Haciendo la conversión de los calores obtenidos para los productos de 1093.3°C a 2204.4°C .

tendremos

$$\text{C} = 13.1 \times (2204.4/1093.3) = 26.42 \text{ Kcal}$$

$$\text{Fe} = 87.5 \times (2204.4/1093.3) = 176.47 \text{ Kcal}$$

$$\text{Contenido de calor en productos} = 176.47 \text{ Kcal}$$

En reactivos

$$\text{Fe}_3\text{C} = 1.071 \times 0.4536 \times (0.14 + 6.2 \times 10^{-5} \times 2204.4) \times 2204.4 = 269.29 \text{ Kcal}$$

$$\Delta H_{2204.4^\circ\text{C}} = -31 + 176.47 - 269.29 = -150.82 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reacción a } 2204.4^\circ\text{C} = -150.82 \text{ Kcal (9-2 b)}$$

EJERCICIO N°10 (7)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de la siguiente reacción



teniendo lugar en el proceso Hall a la temperatura de 1000°C. Aunque esta temperatura se encuentra por debajo del punto de fusión del Al_2O_3 , la alumina se encuentra realmente en estado líquido, disuelta en criolita. Asumir entonces, que el contenido de calor del Al_2O_3 incluye su calor de fusión.

SOLUCION

1
Reacción



Datos

Calores de formación (Kcal/mol)

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = -380000$$

$$\text{CO} = -29100$$

Calores específicos (Kcal./peso o volumen x grado)

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,2166 + 4,4 \times 10^{-5}T + 5126/T^2$$

$$\text{CO} = 0,324, \text{ entre } 0 \text{ y } 1000^\circ\text{C}$$

$$\text{C} = 0,351 \quad " \quad "$$

$$\text{Al líquido} = 0,26 \quad "$$

Contenido de calor del Al hasta su temperatura de fusión (659°C) = 240 Kcal./Kg

Calores latentes

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 250 \text{ Kcal./Kg.}$$

$$\text{Al} = 94,5 \quad "$$

Cálculo del calor de reacción a temperatura ambiente

$$\Delta H_{\text{reacción}} = 3(-29160) - (-380000) = +292520 \text{ kcal}$$

Cálculo del contenido de calor a 1000°C

Productos

$$Q, \text{CO} = 3 \times 22,4 \times 0,324 \times 1000 = 21773 \text{ Kcal.}$$

$$Q, \text{Al} = 2 \times 25 \times 240 + 2 \times 27 \times 94,5 + 2 \times 27 \times 0,26(1000 - 659) = 22851 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Contenido de calor en productos} = 44624 \text{ Kcal.}$$

Reactivos

$$Q, \text{Al}_2\text{O}_3(273) = 102 \times (0,2166 + 4,4 \times 10^{-5} \times 273 + 5126/273^2) \times 273 = 8281 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{Al}_2\text{O}_3(1273\text{K}) = 102 \times (0,2166 + 4,4 \times 10^{-5} \times 1273 + 5126/1273^2) \times 1273 = 35808 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{neto del } \text{Al}_2\text{O}_3 = 35808 - 8281 = 27527 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{total } \text{Al}_2\text{O}_3 = 27527 + 102 \times 250 = 53027 \text{ Kcal}$$

$$Q, \text{C} = 3 \times 12 \times 0,351 \times 1000 = 12636 \text{ Kcal}$$

$$\text{Contenido de calor en reactivos} = 65663 \text{ Kcal}$$

$$\Delta H_{\text{reacción a } 1000^\circ\text{C}} = 292520 + 44624 - 65663 = 271481 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reacción a } 1000^\circ\text{C} = +271481 \text{ Kcal (10-1)}$$

EJERCICIO N°11 (7)

La reacción para la reducción del zinc a partir del mineral de zinc tostado es la siguiente



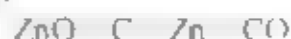
PREGUNTAS

1 El calor de esta reacción cuando tiene lugar en la retorta de zinc, comenzando y terminando a 1000°C

2 El calor requerido por la reacción, por kilogramo de vapor de zinc producido, asumiendo e hecho de que el óxido de zinc y el carbono entran fríos a la retorta (suponer a 0°C)

SOLUCION

1
Reacción



Datos

Calores de formación (Kcal/mol)

$$\begin{aligned}\text{CO} &= -29160 \\ \text{ZnO} &= -83500\end{aligned}$$

Calores específicos

$$\begin{aligned}\text{Zn(g)} &= 0,077 \\ \text{CO} &= 0,242 + 1,8 \times 10^{-4} t \text{ (Kcal/Kg.)} \\ \text{C} &= 0,206 + 1,78 \times 10^{-4} t - 3,3 \times 10^{-6} t^2 \\ \text{ZnO} &= 0,1149 + 2,07 \times 10^{-5} t - 1,93 \times 10^{-8} t^2\end{aligned}$$

Contenido de calor del Zn hasta su temperatura de fusión (905°C) = 553 Kcal/mol

$$\Delta H_{\text{reacción}} (0^\circ\text{C}) = -29160 + 83500 = +54340 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor a 1000°C

Productos.

$$\begin{aligned}Q_{\text{Zn}} &= 65,4 \times 553 + 65,4 \times 0,077 \times (1000 - 905) = 36645 \text{ Kcal} \\ Q_{\text{CO}} &= 28 (0,242 + 1,8 \times 10^{-4} \times 1000) \times 1000 = 7280 \text{ Kcal} \\ \text{Contenido de calor en productos} &= 43925 \text{ Kcal}\end{aligned}$$

Reactivos

$$\begin{aligned}Q_{\text{C}} &= 12 (0,206 + 1,78 \times 10^{-4} \times 1000 - 3,3 \times 10^{-6} \times 1000^2) \times 1000 = 4212 \text{ Kcal} \\ Q_{\text{ZnO}} &= 81,4 (0,1149 + 2,07 \times 10^{-5} \times 1000 - 1,93 \times 10^{-8} \times 1000^2) \times 1000 = 9955 \text{ Kcal} \\ \text{Contenido de calor en reactivos} &= 14167 \text{ Kcal}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{reacción a } 1000^\circ\text{C}} &= 54340 + 43925 - 14167 = 84098 \text{ Kcal} \\ \text{Calor de reacción} &= 84098 \text{ Kcal. (11-1)}\end{aligned}$$

2

En este caso, se asume que los reactivos por encontrarse a 0°C, su contenido de calor es 0 (por tanto, solo los productos aportan calor)

Para 1 Kg. de Zn, el balance de las cantidades que intervienen en la reacción será

$$\begin{aligned}\text{CO} &= 1 \times (28/65,4) = 0,428 \text{ Kg} \\ \text{ZnO} &= 1 \times (81,4/65,4) = 1,245 \text{ Kg} \\ \text{C} &= 1 \times (12/65,4) = 0,183 \text{ Kg}\end{aligned}$$

Los calores calculados anteriormente, los ajustamos para 1 Kg. de Zn

$$\begin{aligned} Q. \text{ Zn} &= 36645/65,4 = 560,32 \text{ Kcal} \\ Q. \text{ CO} &= 7280 \cdot (0,428/28) = 111,28 \text{ Kcal} \\ \text{Calor en productos} &= 671,60 \text{ kcal} \end{aligned}$$

$$\Delta H. \text{ reacción} = 54340,65,4 - 671,6 - 0 = 1502,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reacción} = 1520,5 \text{ Kcal/Kg. de Zn (11-2)}$$

EJERCICIO N°12 (9)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor específico medio del aire seco para las siguientes zonas de temperatura

- a) 77°F a 2000°F
- b) 77°F a 1000°F
- c) 1000°F a 2000°F

SOLUCION

1 a

Para este cálculo utilizaremos la siguiente ecuación (9)

$$H_2 - H_1 = C_m x (t_2 - t_1) \quad (3)$$

donde

$H_2 - H_1$ = cambio en el contenido calorífico por peso unitario

C_m = calor específico medio a presión constante

$t_2 - t_1$ = cambio de temperatura.

Datos

Peso molecular del aire = 29

Composición en peso del aire: N = 76,8%, O = 23,2%

En la tabla A-3 de (9), encontramos

Cuando $t = 2000^\circ\text{F}$, $H_1 - H_{77}$

Para O = 15400 BTU/lb-mol

Para N = 14600 BTU/lb-mol

Para una mol de aire

$$H_{2000} - H_{77} = 15400 \times 0,232 + 14600 \times 0,768 = 14785,6 \text{ BTU/lb-mol}$$

Sustituyendo en (3)

$$C_m = \{14785,6 / (2000 - 77)\} \times (1/29) = 0,265 \text{ BTU/lb-mol}^\circ\text{F}$$

$$\text{Calor específico medio del aire} = 0,265 \text{ BTU/lb-mol}^\circ\text{F (12-1 a)}$$

b

Cuando $t = 1000^\circ\text{F}$, $H_1 - H_{77}$

Para O = 6970 BTU/lb-mol

Para N = 6620 "

$$H_{1000} - H_{77} = 6970 \times 0,232 + 6620 \times 0,768 = 6701,2 \text{ BTU/lb-mol de aire}$$

$$C_m = \{6701,2 / (1000 - 77)\} \times (1/29) = 0,2503 \text{ BTU/lb-mol}^\circ\text{F}$$

$$\text{Calor específico medio del aire} = 0,2505 \text{ BTU/lb-mol}^\circ\text{F (12-1 b)}$$

De 1000°F a 2000°F

$$(H_{2000} - H_{77}) - (H_{1000} - H_{77}) = H_{2000} - H_{1000}$$

$$H_{2000} - H_{1000} = 14785,6 - 6701,2 = 8084,4 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$C_m = (1/29) \{8084,4 / (2000 - 1000)\} = 0,2788 \text{ BTU/lb-mol}^\circ\text{F}$$

Calor específico medio para el aire, entre 1000 y 2000°F = 0,2788 BTU/lb-mol°F (12-1.c)

EJERCICIO N°13 (9)

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH para la siguiente reacción a 25°C, en calorías por mol de FeS



2. ¿Es esta reacción endotérmica o exotérmica?

SOLUCION

1. Calores de formación a 25°C (298K)

$$\text{FeS} = -22,72 \text{ Kcal/mol}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = -267,0$$

$$\text{SO}_2 = 70,96$$

Hay que volver a balancear la reacción para adaptarla a 1 mol de FeS, dividiendo por 3



$$\Delta H_{\text{reacción}} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = 70,96 + 1/3(-267) - (-22,72) = -137,24 \text{ Kcal/mol FeS}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = -127240 \text{ cal/mol de FeS (13-1)}$$

2. Por ser ΔH negativo, esta reacción desprende calor y por lo tanto es exotérmica

Reacción exotérmica (13-2)

EJERCICIO N°14 (9)

PREGUNTAS

1. ¿Cuánto calor es absorbido por la siguiente reacción a 25°C y 1 atmósfera de presión, en BTU por 100 libras de zinc producido?



SOLUCION

1.

Calores de formación a 25°C (Kcal/mol)

$$\text{ZnO} = -83,17$$

$$\text{CO} = -26,6$$

Cálculo del número de moles

$$\text{ZnO} = 100(81,4/65,4) = 124,46 \text{ lbs.} = 1,529 \text{ lb-mol}$$

$$\text{CO} = 100 \cdot (28/65,4) = 42,81 \text{ lbs.} = 1,529 \text{ lb-mol}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = 1,529 \times (-29 \times 1000) - 1,529 \times (-83,17 \times 1000) = 81908,53 \text{ lb-cal/lb-mol}$$

$$1 \text{ lb-cal} = 1,8 \text{ BTU}$$

$$\Delta H_{\text{reacción}} = 81908,53 \text{ (lb-cal/lb-mol)} \times (1,8 \text{ BTU/lb-cal}) = 147435$$

$$\text{Calor absorbido} = 147435 \text{ BTU por 100 libras de Zn producido (14-1)}$$

EJERCICIO N°15 (9)

La hematita (Fe_2O_3) es reducida a hierro metálico por el carbono, y el producto gaseoso resultante de la reacción de reducción es una mezcla de CO y CO_2 , con dos partes de CO por cada parte de CO_2 , en volumen

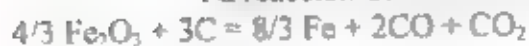
PREGUNTAS

- I Calcular ΔH para este proceso a 25°C en las unidades siguientes
 - a) BTU por tonelada corta de hierro producido.
 - b) Kilocalorías por tonelada métrica de Fe_2O_3 reducida.

SOLUCION

I a

La reacción de reducción para que se cumplan las relaciones gaseosas, será



Datos:

Calores de formación a 25°C , ΔH_{298} (lb-cal./lb-mol):

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = -196,500$$

$$\text{CO} = -29,600$$

$$\text{CO}_2 = -97,200$$

Cálculo del número de moles

$$\text{Fe} = 1 \text{ tonelada corta} = 2000 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2000 \times (1,333 \times 160 / 2,667 \times 56) = 2857,14 \text{ lbs.} = 17,857 \text{ lb-mol.}$$

$$\text{CO} = 2000 \times (2 \times 28 / 2,667 \times 56) = 750 \text{ lbs.} = 26,785 \text{ lb-mol}$$

$$\text{CO}_2 = 2000 \times (44 / 2,667 \times 56) = 589,29 \text{ lbs.} = 13,393 \text{ lb-mol}$$

$$\Delta H_{298} = \sum \Delta H_{\text{productos}} - \sum \Delta H_{\text{reactivos}}$$

$$\Delta H_{298} = -26,785 \times 29,600 - 13,393 \times 97,200 + 17,857 \times 196,500$$

$$= 1'414,300 \text{ lb-cal/lb-mol}$$

$$1 \text{ lb-cal} = 1,8 \text{ BTU}$$

$$\Delta H_{298} = 1'414,300 \times 1,8 = 2'545,740 \text{ BTU/ton. de Fe}$$

$$\Delta H_{298} = 2'545,740 \text{ BTU por ton. de Fe reducido (15-1.a)}$$

I b

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1000 \text{ Kg.} = 6,25 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{CO} = 1000 \times (2 \times 28 / 1,333 \times 160) = 262,5 \text{ Kg.} = 9,375 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{CO}_2 = 1000 \times (44 / 1,333 \times 160) = 206,25 \text{ Kg.} = 4,6875 \text{ Kg.-mol}$$

Los calores de formación expresados en lb-cal./lb-mol, son equivalentes a Kcal./Kg.-mol

$$\Delta H_{298} = -9,375 \times 29,600 - 4,6875 \times 97,200 + 6,25 \times 196,500 = 495000$$

$$\Delta H_{298} = 495000 \text{ Kcal. por tonelada de Fe}_2\text{O}_3 \text{ (15-1.b)}$$

EJERCICIO N°16 (9)

Una muestra de carburo de tungsteno (WC) se quema a WO_3 y $\text{CO}_2(\text{g})$ utilizando oxígeno en un recipiente blindado, para que la combustión se produzca a volumen constante.

El recipiente y el contenido están a 25°C antes de la combustión y después se les enfría a la misma temperatura.

El calor total producido en el recipiente durante la combustión y el enfriamiento sucesivo es de 6080 joules por gramo de WC.

Supóngase que tanto el CO_2 como el O_2 se comportan como gases ideales, para lo cual es válida la ecuación de los gases ideales y el calor a presión constante (H), así como el calor a volumen constante (U) son independientes de la presión.

PREGUNTAS

- Calcular ΔH para la reacción de la combustión a 25°C y 1 atmósfera de presión, en calorías por mol. de WC.
- Calcular el calor de formación de carburo de tungsteno a partir de W y C grafito a 25°C , en cal/mol.

SOLUCION

1

Reacción de combustión



Utilizaremos las siguientes expresiones.

$$H = U + PV \quad (4)$$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n(\text{g}) \cdot RT \quad (5)$$

donde

P = presión

V = volumen

T = temperatura (K)

ΔH = cambio de calor a presión constante

ΔU = cambio de calor a volumen constante

$\Delta n(\text{g})$ = # de moles gaseosos de los productos - # de moles gaseosos de los reactivos

R = constante universal de los gases ideales

$R = 1,987 \text{ cal/mol} \cdot \text{K} = 8,314 \text{ joules/mol} \cdot \text{K}$

Peso atómico de W = 183,9

$$\Delta U = -6080 \text{ (J/g WC)} \times (183,9 \text{ g/mol}) \times (1,987 \text{ cal} \cdot 8,314 \text{ J}) = -267222,6 \text{ cal/mol WC}$$

$$\Delta n(\text{g}) = \text{moles de CO}_2 - \text{moles de O}_2 = 1 - 2,5 = -1,5$$

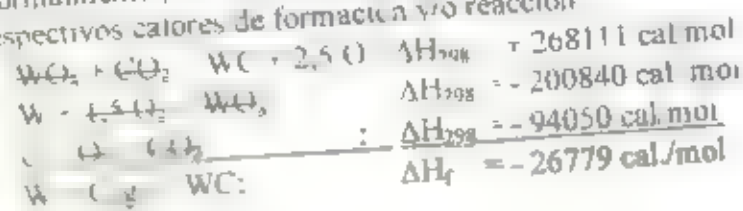
Utilizando la ecuación (5)

$$\Delta H_{298} = -267222,6 - 1,5 \times 1,987 \times 298 = -268111$$

$$\Delta H_{298} = -268111 \text{ cal/mol WC (16-1)}$$

2

Los calores de formación, de combustión, de reacción, etc. para casi todos los compuestos se encuentran tabulados, normalmente para 25°C . Sobre esa base vamos a estructurar el siguiente sistema de reacciones con sus respectivos calores de formación y/o reacción.



Calor de formación del WC a 25°C = - 26779 cal./mol. (16-2)

EJERCICIO N°17 (9)

PREGUNTAS

1. Calcular ΔH para la siguiente reacción a 1000°C, en calor



SOLUCION

1

Para evaluar ΔH a temperaturas mayores que la ambiente (25°C = 298K), haremos uso de las siguientes expresiones

$$\Delta H_T = \Delta H_{298} + \int_{298}^T \Delta C_p dT \quad (6)$$

$$\Delta C_p = \sum C_p(\text{productos}) - \sum C_p(\text{reactivos}) \quad (7)$$

$$H_T - H_{298} = aT + bT^2 + cT^{-1} + d \quad (8)$$

donde

C_p = capacidad calorífica a presión constante, y tiene la forma ($a + 2bT + cT^{-1}$)

a, b, c, d, \dots = constantes experimentales, se encuentran en tablas (9).

Datos:

Calores de formación de compuestos ($\Delta H_{f,298}$) = cal/mol

$$\text{CO}_2 = - 97200$$

$$\text{CO} = - 29600$$

$$\text{H}_2\text{O(g)} = 57800$$

$$\text{H}_2 = 0$$

Capacidades caloríficas a presión constante (C_p) = cal/mol.K

$$\text{CO} = 6,79 + 2 \times 10^{-4} T - 0,11 \times 10^{-5} T^{-2}$$

$$\text{H}_2\text{O(g)} = 7,17 + 2 \times 10^{-4} T + 0,08 \times 10^{-5} T^{-2}$$

$$\text{H}_2 = 6,52 + 2 \times 10^{-4} T + 0,12 \times 10^{-5} T^{-2}$$

$$\text{CO}_2 = 10,55 + 2 \times 10^{-4} T - 2,04 \times 10^{-5} T^{-2}$$

$$\Delta H_{298, \text{reacción}} = \sum \Delta H_{298, \text{productos}} - \sum \Delta H_{298, \text{reactivos}}$$

$$\Delta H_{298, \text{reacción}} = - 29600 - 57800 + 97200 = - 9800 \text{ cal/mol}$$

Con los datos de C_p y la ecuación (7):

$$\Delta C_p = C_{p, \text{CO}} + C_{p, \text{H}_2\text{O}} - C_{p, \text{CO}_2} - C_{p, \text{H}_2}$$

$$\Delta C_p = - 3,11 + 6 \times 10^{-4} T + 1,89 \times 10^{-5} T^{-2}$$

Dando valores a la ecuación (6)

$$\Delta H_{1273} = 9800 + \int_{298}^{1273} (- 3,11 + 6 \times 10^{-4} T + 1,89 \times 10^{-5} T^{-2}) dT$$

$$= 7713 \text{ cal/mol}$$

$$\Delta H_{1273} = 7713 \text{ cal/mol (17-1)}$$

Este mismo cálculo se puede realizar por medio de la ecuación (8)

$\Delta H_T = \Delta H_{298} + \Delta aT + \Delta bT^2 + \Delta cT^{-1} + \Delta d$
 Los valores de estas constantes son los mismos que se dieron para C_p , por tanto

$$\begin{aligned}\Delta a &= (6.79 + 7.76 \times 10^{-5}) \times T = 3.11T \\ \Delta b &= (0.49 + 1.28 \times 10^{-3} T - 0.3 \times 10^{-7} T^2) \\ \Delta c &= (0.11 - 0.08 \times 10^{-4} T + 0.12 \times 10^{-6} T^2) = 1.89 \times 10^{-5} T \\ \Delta d &= (-2105 - 2225 + 3926 + 1939) = 1535\end{aligned}$$

$$\Delta H_T = 3.11 \times 1273 + 0.3 \times 10^{-7} \times 1273^2 - 1.89 \times 10^{-5} \times 1273 + 1535 + 9800 = 7714$$

$$\Delta H_{1273} = 7714 \text{ cal/mol (17-1)}$$

EJERCICIO N°18 (9)

PREGUNTAS

Derivar una ecuación, expresando ΔH en calorías por mol, como una función algebraica de la temperatura (K) para la siguiente reacción:



SOLUCION

Partimos de la ecuación

$$\Delta H = \int \Delta C_p dT$$

Datos

ΔH_{298} (cal/mol), para

$$\text{CO}_2 = -97200$$

$$\text{CO} = -29600$$

C_p (cal/mol · K), para

$$\text{CO}_2 = 10.55 + 2 \times 1.08 \times 10^{-5} T - 2.04 \times 10^{-8} T^2$$

$$\text{O}_2 = 7.16 + 2 \times 0.5 \times 10^{-5} T - 0.4 \times 10^{-8} T^2$$

$$\text{CO} = 6.79 + 2 \times 0.49 \times 10^{-5} T - 0.11 \times 10^{-8} T^2$$

$$\Delta C_p = 0.18 + 6.8 \times 10^{-6} T - 1.73 \times 10^{-8} T^2$$

$$\Delta H_{298} = -97200 + 29600 = -67600 \text{ cal/mol}$$

$$\Delta H = \int (0.18 + 6.8 \times 10^{-6} T - 1.73 \times 10^{-8} T^2) dT$$

$$\Delta H = 0.18T + (6.8 \times 10^{-6}/2)T^2 - 1.73 \times 10^{-8} T^3 + I$$

Como integramos sin fronteras, aparece una constante de integración "I", para evaluar la cual le damos a T un valor conocido (298K); teniendo en cuenta que en ese instante, $\Delta H = \Delta H_{298}$ que ya se determinó

$$I = -67600 - 0.18 \times 298 - \frac{1}{2} (6.8 \times 10^{-6} \times 298^2) + 1.73 \times 10^{-8} \times 298^3 = -68264$$

$$\Delta H = 0.18T + \frac{1}{2} \times 6.8 \times 10^{-6} T^2 + 1.73 \times 10^{-8} T^3 - 68264 \text{ (18-1)}$$

EJERCICIO N°19 (8)

PREGUNTAS

Calcular el calor desprendido, expresado en BTU, cuando se mezclan a 25°C: 50 libras de H_2SO_4 con 50 libras de H_2O

SOLUCION

1
El calor de mezcla es el calor de solución cuando el soluto y el solvente son líquidos (8)

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 50 \text{ lbs} (0,4536 \text{ Kg./1 lb.}) = 22,60 \text{ Kg.} = \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 22,68/98 = 0,231 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 22,68/18 = 1,26 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{Moles de H}_2\text{O}/\text{moles de H}_2\text{SO}_4 = 1,26/0,231 = 5,45$$

La figura # 75 página 334 (8) presenta en las abscisas la relación moles de agua por mol de ácido, va calculada y en las ordenadas las kilocalorías por kilogramo mol de ácido. De ahí se extrajo que

$$\text{Para una relación de 5,45; } \Delta H (\text{solución}) = -14000 \text{ Kcal./kg.-mol}$$

$$1 \text{ Kilocaloria} = 3,968 \text{ BTU}$$

$$\Delta H_{\text{solución}} = -14000 (\text{Kcal./Kg.-mol}) \times 0,231 \text{ Kg.-mol} \times (3,968 \text{ BTU/1 Kcal}) \\ = -12776,96 \text{ BTU}$$

$$\text{Calor de mezcla} = -12777 \text{ BTU (19-1)}$$

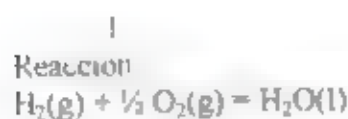
EJERCICIO N°20 (8)

En la combustión a volumen constante de 2 gramos de $\text{H}_2(\text{g})$ para formar agua líquida se desarrollan 67,45 Kilocalorías.

PREGUNTAS

1 Calcular la cantidad de calor que se desarrollaría si la reacción se realiza a presión constante a 17°C

SOLUCION



Vamos a utilizar la expresión (5)

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n(\text{g}) \cdot R \cdot T$$

Debemos calcular $\Delta n(\text{g})$

$$\text{Moles de H}_2 = 2/2 = 1 \text{ g.-mol}$$

$$\text{Moles de O}_2 = 2 \times (16/2) \times (1/32) = 0,5 \text{ g.-mol}$$

Los moles de agua no intervienen en el cálculo por estar en estado líquido

$$\Delta n(\text{g}) = 0 - 0,5 - 1 = -1,5$$

$$\Delta H = -67450 - 1,5 \times 1,987 \times 290 = -68314 \text{ cal}$$

$$\text{A presión constante se desarrollarían } 68314 \text{ cal (20-1)}$$

EJERCICIO N°21 (8)

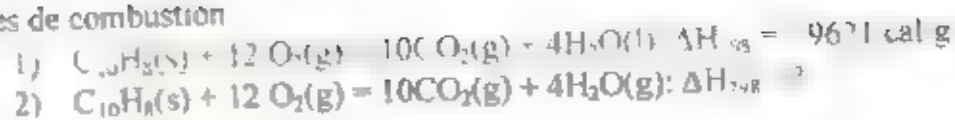
Cuando 1 gramo de naltaleno (C_{10}H_8) se quema en una bomba calorimétrica condensándose el agua formada, se desprenden 9621 calorías a 25°C

PREGUNTAS

1 Calcular el calor de combustión a presión constante a 25°C si el vapor de agua permanece sin condensar

SOLUCION

Reacciones de combustión



Por la observación de las reacciones (1) y (2) se puede ver que se diferencian en que en (1) el agua está líquida y en (2) se encuentra en forma de vapor. Cuando el agua se condensa desprende calor, mientras que si permanece en estado gas este calor lo conserva. El valor del calor desprendido será entonces mayor cuando se condensa a líquido

El cambio calorífico sería = ΔH , agua líquida - calor utilizado en pasar de 25 a 100°C - calor latente de vaporización.

Datos para el agua

$$\text{Calor latente de vaporización} = 9717 \text{ cal/g.-mol}$$

$$C_p \text{ a } 25^\circ\text{C} = 8,084 \text{ cal/g.-mol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1 \cdot (4 \times 18 / 128) = 0,5625 \text{ g.} = 3,125 \times 10^{-3} \text{ g.-mol}$$

$$\text{Calor latente de vaporización} = 3,125 \times 10^{-3} \times 9717 = 304 \text{ cal}$$

$$\Delta H_{100} = 3,125 \times 10^{-3} \times 8,084 \cdot (100 - 25) = 19 \text{ cal}$$

$$\Delta H_T = -9621 + 304 + 19 = -9298 \text{ cal/g. de C}_{10}\text{H}_8$$

$$\text{Calor desprendido} = 9298 \text{ cal./gramo (21-1)}$$

EJERCICIO N°22 (8)

El dióxido de azufre se oxida con un 100% de exceso de aire con una conversión del 80% a SO_3

Los gases entran al convertidor a 400°C y salen a 450°C

PREGUNTAS

1. ¿Cuántas kilocalorías se absorben en el cambiador de calor de, convertidor por kilogramo - mol de SO_2 introducido?

SOLUCION

1
Reacción de oxidación



Datos

Calores normales de formación a 25°C, 1 atm. (Kcal/mol-g.)

$$\text{SO}_2 = -70960$$

$$\text{SO}_3 = -94450$$

Capacidades caloríficas medias (cal/mol-g), pag.269 (8):

$$\text{A } 400^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 &= 10,94 \\ \text{Aire} &= 7,152 \\ \text{SO}_3 &= 15,22 \\ \text{N}_2 &= 7,089 \\ \text{O}_2 &= 7,406 \end{aligned}$$

A 500°C

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 &= 11,22 \\ \text{Aire} &= 7,225 \\ \text{SO}_3 &= 15,82 \\ \text{N}_2 &= 7,159 \\ \text{O}_2 &= 7,515 \end{aligned}$$

La expresión que utilizaremos para este cálculo es
 $\Delta H = \sum \Delta H_f, 25^\circ\text{C} + \sum \Delta H_f, \text{productos} - \sum \Delta H_f, \text{reactivos}$
 $\text{O}_2, \text{teórico} = 0,5 \text{ Kg.-mol}$
 $\text{O}_2, \text{suministrado} = 0,5 \times 2 = 1,0 \text{ kg.-mol}$
 $\text{Aire suministrado} = 1/0,21 = 4,762 \text{ Kg.-mol}$
 $\text{N}_2, \text{presente} = 4,762 - 1 = 3,762 \text{ Kg.-mol}$
 $\text{O}_2, \text{no utilizado} = 1 - 0,5 \times 0,8 = 0,6$

$$\sum \Delta H_f, 25^\circ\text{C} = -94450 + 70960 = -23490 \text{ Kcal/Kg.-mol}$$

Contenido de calor en los reactivos al entrar:

$$\text{SO}_2 = 10,94 \times 1 \times (400 - 25) = 4102,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Aire} = 7,152 \times 4,762 \times (400 - 25) = 12771,7 \text{ Kcal}$$

$$\sum \Delta H_f, \text{reactivos} = 16874,2 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor de los gases al salir:

$$\text{SO}_3 = 1,0 \times \{(15,22 + 15,82)/2 \times (450 - 25)\} = 6596 \text{ Kcal}$$

$$\text{N}_2 = 3,762 \times \{(7,089 + 7,159)/2 \times (450 - 25)\} = 10050,2 \text{ Kcal}$$

$$\text{O}_2 = 0,6 \times \{1/2 \times (7,406 + 7,515) \times (450 - 25)\} = 1902,4 \text{ Kcal}$$

$$\sum \Delta H_f, \text{productos} = 18548,6 \text{ Kcal}$$

$$\Delta H = 18548,6 - 23490 - 16874,2 = -21815,6 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor absorbido por el cambiador} = -21815,6 \text{ Kcal. (22-1)}$$

EJERCICIO N°23 (8)

Vapor de agua a 200°C, recalentado 50°, atraviesa un techo de coque que inicialmente se encuentra a 1200°C

Los gases salen a una temperatura media de 800°C con la siguiente composición en volumen sobre base seca

$$\begin{array}{ll} \text{H}_2 & 53,5\% \\ \text{CO} & 39,7 \\ \text{CO}_2 & 6,8 \end{array}$$

Del vapor introducido, el 30% pasa sin descomponerse

PREGUNTAS

Calcular el calor de reacción en kilocalorías por kilogramo mol de vapor introducido por respectivo medio del coque (o a 1200°C) = 0,35

SOLUCION

Reaccion de gasificacion



Base de cálculo = 1 kg.-mol de H_2O

Cálculos estequiométricos

$$H_2O = 1 \text{ Kg. - mol} = 22,4 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ que reacciona} = 22,4 \times 0,7 = 15,68 \text{ m}^3 = 0,7 \text{ Kg. - mol}$$

$$H_2O \text{ que no reacciona} = 0,3 \text{ Kg. - mol}$$

$$H_2 \text{ producido} = 15,68 \text{ m}^3 = 0,7 \text{ Kg. - mol}$$

$$CO \text{ producido} = 15,68 \cdot (39,7/53,5) = 11,635 \text{ m}^3 = 0,5194 \text{ Kg. - mol.}$$

$$CO_2 = 15,68 \cdot (6,8/53,5) = 1,993 \text{ m}^3 = 0,089 \text{ Kg. - mol}$$

$$C \text{ total} = 11,635 (12/22,4) + 1,993 (12/22,4) = 7,301 \text{ Kg} \quad 0,6084 \text{ Kg. - mol}$$

Datos

Capacidades caloríficas medias

$$H_2O = 8,804 \text{ (a } 100^\circ\text{C)}; 8,177 \text{ (a } 200^\circ\text{C)}; 8,215 \text{ (a } 300^\circ\text{C)}$$

A 800°C

$$H_2 = 7,060; CO = 7,443; CO_2 = 11,53$$

Calores de formación a 25°C (Kcal./mol-g)

$$H_2O(l) = -68317,4; \text{ calor latente de vaporización} = 9717$$

$$H_2O(g) = -68317,4 + 9717 = -58600,4$$

$$CO = -26415,7$$

$$CO_2 = -94051,8$$

$$\Delta H = \sum \Delta H(P) + \sum \Delta H(25^\circ) - \sum \Delta H(R)$$

$$\sum \Delta H(25^\circ) = 0,5184 \times 26415,7 + 0,089 \times 94051,8 + 0,7 \times 58600 = 18929 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en material al entrar

$$H_2O = 8,084 \times 1 \times (100 - 25) + 1 \times 9717 + \{ 1,2 \times (8,177 + 8,215) \times (250 - 100) \} = 11553 \text{ Kcal}$$

$$C = 7,301 \times 0,35 \times 1200$$

$$= 3066 \text{ Kcal}$$

$$\sum \Delta H(R) = 11553 + 3066$$

Contenido de calor en los productos al salir

$$H_2O = 0,3 \times 8,084 (100 - 25) + 0,3 \times 9717 + 0,3 \times (8,177 + 8,215) \times (800 - 100) = 4818$$

Kcal

$$H_2 = 0,7 \times 7,060 \cdot (800 - 25)$$

$$= 3830 \text{ Kcal}$$

$$CO = 0,5194 \times 7,443 \cdot (800 - 25)$$

$$= 2996 \text{ Kcal}$$

$$CO_2 = 0,089 \times 11,53 \cdot (800 - 25)$$

$$= 795 \text{ Kcal}$$

$$\sum \Delta H(P)$$

$$= 12439 \text{ Kcal}$$

$$\Delta H = 18929 - 14619 + 12439 = 16749 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de reacción} = 16749 (23-1)$$

EJERCICIO N°24 (8)

Una piedra caliza ($CaCO_3$) pura, se calienta en un horno vertical continuo por combustión de un gas pobre en contacto directo con la carga

Los productos gaseosos de combustión y calcinación suben verticalmente atravesando la

La caliza se carga a 25°C y la cal calcinada se recoge a 900°C.

El gas pobre entra a 600°C y se quema con la cantidad de aire teóricamente necesaria a 25°C. Los productos gaseosos salen a 200°C

El análisis del gas pobre, en volumen es el siguiente

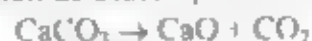
CO ₂	9,21%
O ₂	1,62
CO	13,60
N ₂	75,57

PREGUNTAS

1. Calcular los metros cúbicos (0°C, 760 mm Hg) del gas pobre que se necesitan para calcinar 100 kilogramos de caliza, despreciando las pérdidas de calor y el contenido en humedad del aire y del gas pobre.

SOLUCION

1.
Reacción de descomposición de la caliza



$$\text{CaCO}_3 = 100 \text{ Kg.} = 1 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{CaO} = 100 \cdot (56/100) = 56 \text{ Kg.} = 1 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{CO}_2 = 100 \cdot (44/100) = 44 \text{ Kg.} = 1 \text{ Kg.-mol.} = 22,4 \text{ m}^3$$

Datos:

Calores de formación (Kcal./Kg.-mol)

$$\text{CaCO}_3 = -288,45 \times 1000 = -288450$$

$$\text{CaO} = -151,9 \times 1000 = -151900$$

$$\text{CO}_2 = -94,0518 \times 1000 = -94052$$

Calor requerido para calcinar (descomponer) el CaCO₃

$$\text{A.H. } 25^\circ\text{C} = -94052 - 151900 + 288450 = 42498 \text{ Kcal}$$

Calor específico del CaO (vía gráfica) = 0,28 Kcal./Kg. (a 900°C)

$$\text{Calor con que sale el CaO} = 56 \times 0,28 \cdot (900 - 25) = 13720 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor de los gases al entrar

Datos

Capacidades caloríficas medias entre 25 y 600°C (Kcal./Kg.-mol.K):

$$\text{CO}_2 = 11,053$$

$$\text{CO} = 7,289$$

$$\text{O}_2 = 7,616$$

$$\text{N}_2 = 7,229$$

$$Q, \text{CO}_2 = 0,0921 \times 11,053 \cdot (600 - 25) = 585 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

$$Q, \text{CO} = 0,136 \times 7,289 \cdot (600 - 25) = 570 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

$$Q, \text{O}_2 = 0,0162 \times 7,616 \cdot (600 - 25) = 71 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

$$Q, \text{N}_2 = 0,7557 \times 7,229 \cdot (600 - 25) = 3141 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

$$\text{Contenido de calor del gas al entrar} = 4367 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

Combustión del gas pobre



$$\text{Calor de combustión del CO} = -67,6361 \times 1000 = 67636,1 \text{ Kcal./Kg.-mol.}$$

$$\text{Calor de combustión} = 0,136 \times (-67636,1) = 9196,5 \text{ Kcal}$$

Productos de combustión = CO₂ + N₂

CO₂, total = del CaCO₃ + combustión + gas pobre

$$\text{CO}_2, \text{total} = 1 + 0,136 + 0,0921 = 1,2281 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{O}_2 \text{ de reacción} = 0,136/2 = 0,068 \text{ Kg.-mol}$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 0,068 - 0,0162 = 0,0518 \text{ Kg.-mol}$$

N₂, total = gas pobre + aire

$$\text{N}_2, \text{total} = 0,7557 + 0,0518 \cdot (79/21) = 0,9506 \text{ Kg.-mol}$$

Contenido de calor de los gases al salir
 Daos

Capacidad calorífica media a 200°C (Kcal./Kg.-mol.K):

$$CO_2 = 9,70$$

$$N_2 = 6,996$$

$$Q, CO_2 = 1,2281 \times 9,7013(200 - 25) = 2085 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

$$Q, N_2 = 0,9506 \times 6,996(200 - 25) = 1164 \text{ Kcal./Kg.-mol.}$$

$$\text{Contenido de calor de los gases al salir} = 3249 \text{ Kcal./Kg.-mol}$$

$$\text{Gas pobre} = (42498 + 13720) \text{ Kcal} - (4367 + 9196,5 + 3249) \text{ Kcal/Kg.-mol}$$

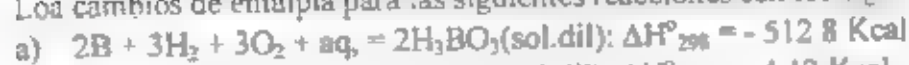
$$= 3,344 \text{ Kg.-mol.}$$

$$\text{Gas pobre} = 3,334 \text{ Kg.-mol} \times (22,4 \text{ m}^3/\text{Kg.-mol}) = 74,9 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas pobre} = 75 \text{ m}^3 (24-1)$$

EJERCICIO N°25 (11)

Los cambios de entalpia para las siguientes reacciones son los siguientes



PREGUNTAS

1. Calcular el calor estandar de formacion del B_2O_3 en términos de por mol de B_2O_3 por gramo de B_2O_3 . Los pesos atomicos son: B = 10,82; O = 16

SOLUCION

Sabemos que el calor normal de formacion de un compuesto es la produccion de una mol de este a partir de sus elementos

Cuando se cambia el sentido de una reaccion el signo del calor de esa reaccion tambien cambia. En este caso vamos a cambiar el sentido de las reacciones (b) y (c). A esta ultima la vamos a multiplicar por 3 y finalmente sumaremos algebraicamente miembro a miembro, tanto las reacciones como sus respectivos calores cancelando terminos identicos pero en distintos extremos del signo de igualdad. Al final y como resultado de lo anterior obtendremos la reaccion (d) con su respectivo calor de formacion. Como vamos a obtener una mol., ese sera el calor molar de formacion.



Calor estándar de formación = - 302,49 Kcal./mol de B_2O_3 (25-1)

Peso molecular del $B_2O_3 = 2 \times 10,82 + 3 \times 16 = 69,64$ g

$$\Delta H_{298}^\circ = - 302,49 \text{ (Kcal./mol)} \times (1 \text{ mol}/69,64 \text{ g.}) = - 4,344$$

Calor de formación = - 4,344 Kcal./gramo de B_2O_3 (25-1)

EJERCICIO N°26 (11)

El carburo de calcio es considerado como un combustible potencia en un convertidor basco de oxígeno, y se espera que haga combustión a CaO y CO o CO_2 dependiendo de las condiciones

PREGUNTAS

Si el calor requerido para elevar la temperatura de la chatarra de acero a $1600^\circ C$ es de 333 Kcal./Kg., calcular cuantos kilogramos de chatarra de acero pueden ser cargados por 1000 kilogramos de CaC_2 , cuando

1. Todo el CaC_2 es consumido para formar CO
2. Todo el CaC_2 es consumido para formar CO_2
3. 60% del CaC_2 es utilizado para producir CO_2 y el resto para CO

Asumir que la reacción tiene lugar a $25^\circ C$

SOLUCION

1

Calores de formación, $\Delta H_{298}^\circ \times 1000$ (Kcal./mol)

$$CaC_2 = - 14,1$$

$$CaO = - 151,8$$

$$CO = - 26,42$$

$$CO_2 = - 94,06$$

Reaccion de combustión.



Calculo del numero de moles

$$CaC_2 = 1000 \text{ Kg.} = 15,625 \text{ moles}$$

$$CaO = 1000 \cdot (56/64) = 875 \text{ Kg.} = 15,625 \text{ moles}$$

$$CO = 1000 \cdot (2 \times 28/64) = 875 \text{ Kg.} = 31,25 \text{ moles}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{298}^\circ &= [31,25 \times (- 26,42) + 15,625 \times (- 151,8) - 15,625 \times (- 14,1)] \times 1000 \\ &= - 2'977,200 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\text{Chatarra} = 2'977,200 \text{ Kcal.} / 333 \text{ Kcal./Kg.} = 8940 \text{ Kg.}$$

$$\text{Chatarra que puede ser cargada} = 8940 \text{ Kg. (26-1)}$$

Reacción de combustión



$$\Delta H^\circ_{298} = 1000 \times (-2 \times 94,06 - 151,8 + 14,1) = -325820 \text{ Kcal/mol de CaC}_2$$

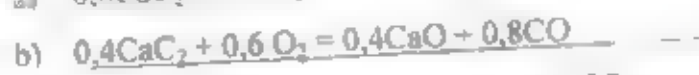
$$\Delta H^\circ_{298} = -325820 (\text{Kcal/mol.CaC}_2) \times (\text{mol.CaC}_2/64 \text{ Kg}) \times 1000 \text{ Kg.} = 5'091.000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Chatarra} = 5'091.000 \text{ Kcal}/333 (\text{Kcal/Kg.}) = 15288 \text{ Kg}$$

$$\text{Chatarra que se puede cargar} = 15288 \text{ Kg. (26-2)}$$

Debemos ajustar el balance de la reacción, de modo que el 60% del gas sea CO_2 . Esto lo hacemos, tomando en consideración que el CaC_2 tiene 2 átomos de C y todo este debe pasar al gas, por tanto el 60% del C $\rightarrow \text{CO}_2$

Reacciones de combustión



$$\Delta H^\circ_{298} = 1000 \times (-0,8 \times 26,42 - 1,2 \times 94,06 - 151,8 + 14,1) = -271708 \text{ Kcal/mol CaC}_2$$

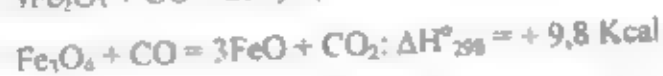
$$\Delta H^\circ_{298} = -271708 (\text{Kcal/mol CaC}_2) \times (\text{mol CaC}_2/64 \text{ Kg}) \times 1000 = 4'245.437,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Chatarra} = 4'245.437,5/333 = 12749 \text{ Kg}$$

$$\text{Chatarra que se puede cargar} = 12749 \text{ Kg. (26-3)}$$

EJERCICIO N°27 (11)

La reacción del óxido de hierro en el alto horno, procede de acuerdo a las siguientes reacciones



PREGUNTAS

1. Calcular ΔH°_{298} para la reacción



SOLUCION

1

Para obtener los resultados pretendidos, la primera reaccion la vamos a multiplicar por (1/3) la segunda por (2/3) y la tercera por (2), haciendo lo mismo con las respectivas entalpias de reaccion para luego proceder a cancelar términos



$$\Delta H^\circ_{298} = -6,5 \text{ Kcal. (27-1)}$$

EJERCICIO N°28 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de reacción del proceso Hall-Heroult en el cual se realiza la siguiente reaccion



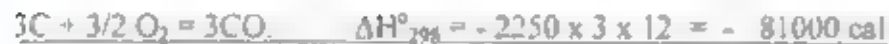
A 25°C, a partir de los siguientes datos



Pesos atomicos: Al = 27, C = 12

SOLUCION

1



$$\Delta H^\circ_{298} = +318,6 \text{ Kcal. (28-1)}$$

EJERCICIO N°29 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular la entalpía del NiO a 1707°C (1980)K
2. El calor requerido para elevar la temperatura de 1 mol. de NiO de 25°C (298 K) a 1707°C (1980K)

Datos

$$\Delta H_{298}^\circ \text{ NiO} = -57,5 \text{ Kcal/mol}$$

$$C_p \text{ NiO} = 12,91 \text{ cal/gradomol}$$

SOLUCION

Debido a que C_p viene expresado en calorías, ΔH_{298}° también debe llevarse a estas unidades. Dando los valores a la expresión (6), tendremos

$$\Delta H_{1980}^\circ = -57500 + \int_{298}^{1980} 12,91 dT = -35785,4 \text{ cal}$$

$$\Delta H_{1980}^\circ = -35,79 \text{ Kcal/mol. (29-1)}$$

2

El calor requerido para elevar de 25°C a 1707°C 1 mol de NiO será

$$\Delta H_{1980}^\circ - \Delta H_{298}^\circ = -35785 + 57500 = +21715 \text{ cal}$$

$$\text{Calor requerido} = 21,715 \text{ Kcal/mol. (29-2)}$$

EJERCICIO N°30 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de reacción para la cloración del óxido de zirconio a 2100°C y a 777°C, de acuerdo a la reacción



Datos

$$\text{Para } \text{ZrCl}_4: \Delta H_{298}^\circ = -234,7 \text{ Kcal/mol}$$

$$C_p = 31,92 - 2,91 \times 10^{-3} T^2 \text{ cal/mol/grado}$$

Para CO_2 : $\Delta H^\circ_{298} = -94,05 \text{ Kcal./mol}$

$$C_p = 10,55 + 2,16 \times 10^{-3}T - 2,05 \times 10^{-5}T^2 \text{ cal./mol./grado}$$

Para ZrO_2 : $\Delta H^\circ_{298} = -259,5 \text{ Kcal./mol}$

$$C_p = 16,64 + 1,8 \times 10^{-3}T - 3,36 \times 10^{-5}T^2$$

Para Cl_2 : $C_p = 8,82 + 0,06 \times 10^{-3}T - 0,68 \times 10^{-5}T^2$

Para el C: $C_p = 4,10 + 1,02 \times 10^{-3}T - 2,10 \times 10^{-5}T^2$

SOLUCION

1

A 25°C (298K)

$$\Delta H^\circ_{298} = \sum \Delta H^\circ_{298, \text{prod.}} - \sum \Delta H^\circ_{298, \text{react}}$$

$$\Delta H^\circ_{298} = -94,05 - 234,7 + 259,5 = -69,25$$

$$\Delta H^\circ_{298} = -69,25 \text{ Kcal. (30-1)}$$

A 777°C (1050K)

$$\Delta H^\circ_{1050K} = \Delta H^\circ_{298K} + \int_{298}^{1050} \Delta C_p dT$$

$$\Delta C_p = \sum \Delta C_{p, \text{prod.}} - \sum \Delta C_{p, \text{react}}$$

$$\begin{aligned} \sum C_{p, \text{prod.}} &= C_{p, \text{CO}_2} + C_{p, \text{ZrCl}_4} \\ &= 10,55 + 2,16 \times 10^{-3}T - 2,05 \times 10^{-5}T^2 \\ &\quad + 31,92 + 2,91 \times 10^{-3}T - 2,91 \times 10^{-5}T^2 \\ &= 42,47 + 2,16 \times 10^{-3}T - 4,96 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum C_{p, \text{react}} &= C_{p, \text{ZrO}_2} + 2C_{p, \text{Cl}_2} + C_{p, \text{C}} \\ &= 16,64 + 1,80 \times 10^{-3}T - 3,36 \times 10^{-5}T^2 \\ &\quad + 2 \times 8,82 + 2 \times 0,06 \times 10^{-3}T - 2 \times 0,68 \times 10^{-5}T^2 \\ &\quad + 4,10 + 1,02 \times 10^{-3}T - 2,10 \times 10^{-5}T^2 \\ &= 38,38 + 2,70 \times 10^{-3}T + 6,82 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_p &= 42,47 + 2,16 \times 10^{-3}T - 4,96 \times 10^{-5}T^2 \\ &\quad - 38,38 - 2,70 \times 10^{-3}T - 6,82 \times 10^{-5}T^2 \\ &= 4,09 - 5,40 \times 10^{-4}T + 1,86 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

$$\Delta H^\circ_{1050K} = -69250 + \int_{298}^{1050} (4,09 - 5,4 \times 10^{-4}T + 1,86 \times 10^{-5}T^2) dT$$

$$\Delta H^\circ_{1050K} = -69250 + 4,09 \times (1050 - 298) - \frac{5,4 \times 10^{-4}}{2} \times (1050^2 - 298^2) + \frac{1,86 \times 10^{-5}}{3} \times (1050^3 - 298^3)$$

$$= -66000 \text{ cal}$$

$$\Delta H^\circ_{1050K} = -66,0 \text{ Kcal. (30-1)}$$

EJERCICIO N°31 (11)

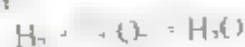
Las capacidades caloríficas molares medias a presión constante para el H_2 , O_2 y vapor de agua en el rango de temperaturas de $25^\circ C$ (298K) a $100^\circ C$ (373K), son respectivamente 6,92, 7,04 y 8,7 cal/mol-grado.

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de formación del vapor de agua a $100^\circ C$, si ΔH_{298}° para el agua es igual a -57,80 Kcal/mol.

SOLUCION

Reacción



A $100^\circ C = 373K$

$$\Delta H_{373}^\circ = \Delta H_{298}^\circ + \int_{298}^{373} \Delta C_p dT$$

$$\Delta C_p = \sum \Delta C_{p, \text{prod}} - \sum \Delta C_{p, \text{react}}$$

$$\Delta C_p = 8,03 - 6,92 - \frac{1}{2} \times 7,04 = -2,41 \text{ cal/mol-grado}$$

Dándole valores a la integral,

$$\Delta H_{373}^\circ = -57800 - 2,41(373 - 298) = -57981 \text{ cal}$$

Calor de formación del vapor de agua a $100^\circ C = -57,981 \text{ Kcal/mol (31.1)}$

EJERCICIO N°32 (11)

En la tostación a muerte del ZnS , ocurre la siguiente reacción



PREGUNTAS

1. Con la ayuda de los siguientes datos, encontrar el calor estándar de reacción a $25^\circ C$ (298K) y a $827^\circ C$ (1100K)

Para ZnS : $\Delta H_{298}^\circ = -48,2 \text{ Kcal/mol}$.

$$C_p = 12,16 + 1,24 \times 10^{-3}T - 1,36 \times 10^{-5}T^2 \text{ cal/mol-grado}$$

Para el O_2 : $C_p = 7,16 + 1,0 \times 10^{-3}T - 0,4 \times 10^{-5}T^2$

Para ZnO : $\Delta H_{298}^\circ = -83,2 \text{ Kcal/mol}$.

$$C_p = 11,71 + 1,22 \times 10^{-3}T - 2,18 \times 10^{-5}T^2$$

Para SO_2 : $\Delta H_{298}^\circ = -70,95 \text{ Kcal/mol}$.

$$C_p = 10,38 + 2,54 \times 10^{-3}T - 1,42 \times 10^{-5}T^2$$

SOLUCION

I

Calor de reacción a 25°C (298K)

$$\Delta H_{298}^{\circ} = \sum \Delta H_{298}^{\circ} \text{ prod.} - \sum \Delta H_{298}^{\circ} \text{ react.}$$

$$\Delta H_{298}^{\circ} = 2x(-70,95) + 2x(-83,2) - 2x(-48,2) = -211,9$$

$$\Delta H_{298}^{\circ} = -211,9 \text{ Kcal/mol. (32-1)}$$

Calor de formación a 827°C (1100K)

$$\Delta H_{1100}^{\circ} = \Delta H_{298}^{\circ} + \int_{298}^{1100} \Delta C_p \cdot dT$$

$$\Delta C_p = \sum \Delta C_{p, \text{ prod.}} - \sum \Delta C_{p, \text{ react.}}$$

$$\begin{aligned} \sum C_{p, \text{ prod.}} &= 2C_{p, \text{ ZnO}} + 2C_{p, \text{ SO}_2} \\ &= 2x(11,71 + 1,22 \times 10^{-3}T - 2,18 \times 10^{-5}T^2) \\ &+ 2x(0,38 + 2,54 \times 10^{-3}T - 1,42 \times 10^{-5}T^2) \\ &= 44,18 + 7,52 \times 10^{-3}T - 7,20 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum C_{p, \text{ react.}} &= 2C_{p, \text{ ZnS}} + 3C_{p, \text{ O}_2} \\ &= 2x(12,16 + 1,24 \times 10^{-3}T - 1,36 \times 10^{-5}T^2) \\ &+ 3x(7,16 + 1,00 \times 10^{-3}T - 0,40 \times 10^{-5}T^2) \\ &= 45,8 + 5,48 \times 10^{-3}T - 3,92 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_p &= 44,18 + 7,52 \times 10^{-3}T - 7,20 \times 10^{-5}T^2 \\ &- 45,80 - 5,48 \times 10^{-3}T + 3,92 \times 10^{-5}T^2 \\ &= -1,62 + 2,04 \times 10^{-3}T - 3,28 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

$$\Delta H_{1100}^{\circ} = -211900 + \int_{298}^{1100} (-1,62 + 2,04 \times 10^{-3}T - 3,28 \times 10^{-5}T^2) dT$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{1100}^{\circ} &= -211900 - 1,62x(1100 - 298) + \frac{2,04 \times 10^{-3}}{2}(1100^2 - 298^2) - \frac{3,28 \times 10^{-5}}{3}(1100^3 - 298^3) \\ &= -212858 \text{ cal} \end{aligned}$$

$$\Delta H_{1100}^{\circ} = -212,86 \text{ Kcal. (32-1)}$$

EJERCICIO N°33 (11)

PREGUNTAS

I Encontrar una fórmula general para el calor de la siguiente reacción, en terminos de temperatura:



Datos

Para ZnO: $\Delta H_{298}^{\circ} = -83,2 \text{ Kcal./mol}$
 $C_p = 11,71 + 1,22 \times 10^{-3}T - 2,18 \times 10^{-5}T^2 \text{ cal./mol./grado}$

Para C: $C_p = 4,10 + 1,02 \times 10^{-3}T - 2,10 \times 10^{-5}T^2$

Para Zn: $C_p = 5,35 + 2,40 \times 10^{-3}T$

Para CO: $\Delta H_{298}^{\circ} = -26,40 \text{ Kcal./mol.}$
 $C_p = 6,80 + 1,0 \times 10^{-3}T - 0,11 \times 10^{-5}T^2$

SOLUCION

Utilizaremos la siguiente expresión

$$\Delta H^\circ_T = \Delta H^\circ_{298} + \int_{298}^T \Delta C_p dT$$

$$\Delta H^\circ_{298} = \Delta H^\circ_{298, \text{CO}} - \Delta H^\circ_{298, \text{ZnO}}$$

$$\Delta H^\circ_{298} = -26,4 + 83,2 = +56,8 \text{ Kcal}$$

$$\Delta C_p = \sum C_{p, \text{prod.}} - \sum C_{p, \text{react.}}$$

$$\begin{aligned} \sum C_{p, \text{prod.}} &= C_{p, \text{CO}} + C_{p, \text{Zn}} \\ &= 6,80 + 1,0 \times 10^{-3} T - 0,11 \times 10^{-5} T^2 \\ &\quad + 5,35 + 2,40 \times 10^{-3} T \\ &= 12,15 + 3,4 \times 10^{-3} T - 0,11 \times 10^{-5} T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum C_{p, \text{react.}} &= C_{p, \text{ZnO}} + C_{p, \text{C}} \\ &= 11,71 + 1,22 \times 10^{-3} T - 2,18 \times 10^{-5} T^2 \\ &\quad + 4,10 + 1,02 \times 10^{-3} T - 2,10 \times 10^{-5} T^2 \\ &= 15,81 + 2,24 \times 10^{-3} T - 4,18 \times 10^{-5} T^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_p &= 12,15 + 3,40 \times 10^{-3} T - 0,11 \times 10^{-5} T^2 \\ &\quad - 15,81 - 2,24 \times 10^{-3} T + 4,28 \times 10^{-5} T^2 \\ &= -3,66 + 1,16 \times 10^{-3} T + 4,17 \times 10^{-5} T^2 \end{aligned}$$

$$\Delta H^\circ = 56800 + \int_{298}^T (-3,66 + 1,16 \times 10^{-3} T + 4,17 \times 10^{-5} T^2) dT$$

Resolviendo esta ecuación en términos de T, obtendremos la fórmula general para calcular el calor de la reacción planteada a cualquier temperatura.

$$\Delta H^\circ_T = 59238,5 - 3,66 T + 0,58 \times 10^{-3} T^2 - 4,17 \times 10^{-5} T^3 \quad (33-1)$$

EJERCICIO N°34 (11)

En una investigación sobre las propiedades del α -manganeso, se determinaron los siguientes contenidos de calor:

$$\Delta H^\circ_{700} - \Delta H^\circ_{298} = 2895 \text{ cal/g.-atom.}$$

$$\Delta H^\circ_{1000} - \Delta H^\circ_{298} = 5450 \quad "$$

PREGUNTAS

1. Encontrar la ecuación adecuada para $[H^\circ_T - H^\circ_{298}]$ y también para C_p como una función de temperaturas, en la forma $(a + bT)$. Asumir que no hay transformaciones estructurales en el rango de temperaturas dadas.

SOLUCION

1. Primero haremos el cálculo determinativo de C_p :

$$2895 = \int_{298}^{700} (a + bT) \cdot dT :$$

$$2895 = a \cdot (700 - 298) + \frac{b}{2} \cdot (700^2 - 298^2) = 402 \cdot a + 200598 \cdot b$$

$$5450 = \int_{298}^{1000} (a + bT) \cdot dT :$$

$$5450 = a \cdot (1000 - 298) + \frac{b}{2} \cdot (1000^2 - 298^2) = 702 \cdot a + 455598 \cdot b$$

Se plantea el siguiente sistema de ecuaciones:

$$1) \quad 2895 = 402 \cdot a + 200598 \cdot b$$

$$2) \quad 5450 = 702 \cdot a + 455598 \cdot b$$

Al resolverlo encontramos que: $a = 5,330$ y $b = 0,00375$

La ecuación quedaría

$$C_p = 5,330 + 3,75 \times 10^{-3} T \quad (34-1)$$

$$H^\circ_T - H^\circ_{298} = \int_{298}^T C_p \cdot dT$$

$$C_p = 5,330 + 3,75 \times 10^{-3} T$$

$$H^\circ_T - H^\circ_{298} = \int_{298}^T (5,330 + 3,75 \times 10^{-3} T) \cdot dT$$

$$H^\circ_T - H^\circ_{298} = 5,330 \cdot (T - 298) + \frac{3,75 \times 10^{-3}}{2} (T^2 - 298^2) \text{ cal./g.-atom.} \quad (34-1)$$

EJERCICIO N°35 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor de vaporización de la plata líquida a 1000°C (1273K) y el calor de fusión de la plata sólida a 900°C (1173K).

Datos.

$$C_{p, \text{ (Ag., s) }} = 5,0 \text{ cal/mol/grado.}$$

$$C_{p, \text{ (Ag., l) }} = 7,3 \quad "$$

$$C_{p, \text{ (Ag., g) }} = 5,0 \quad "$$

$$\text{Calor de fusión de Ag. A } 961^\circ\text{C (1234K)} = 2,69 \text{ Kcal/mol}$$

$$\text{Calor de vaporización de Ag. A } 2200^\circ\text{C (2473K)} = 60 \text{ Kcal./ml}$$

SOLUCION

Durante la fusión se efectúa la siguiente reacción



$$\Delta H_f = \lambda_f + \int \Delta C_p \cdot dT$$

ΔH_f = calor de fusión

T_1 = temperatura a la cual funde la plata en condiciones normales = $961^\circ\text{C} = 1234\text{K}$

T_2 = temperatura a la cual se va a fundir la plata = $900^\circ\text{C} = 1173\text{K}$

λ_f = calor latente de fusión

$$\Delta C_p = C_p(l) - C_p(s) = 7,3 - 5 = 2,3 \text{ cal/mol.K} = 0,0023 \text{ Kcal/mol.K}$$

Integrando:

$$\Delta H_f = 2,69 + 0,0023 \times (1173 - 1234) = 2,597 \text{ Kcal/mol}$$

Calor de fusión de la plata a $900^\circ\text{C} = 2,597 \text{ Kcal/mol. (35-1)}$

Durante la vaporización, la reacción es



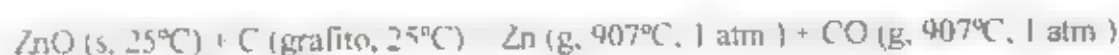
Siguiendo el mismo mecanismo que en el caso anterior

$$\Delta H = 60 + \int_{273}^{1000} \left(\frac{5 - 7,3}{1000} \right) dT = 62,76$$

Calor de vaporización de la plata a $1000^\circ\text{C} = 62,76 \text{ Kcal/mol. (35-2)}$

EJERCICIO N°36 (11)

El ZnO puro es reducido por la cantidad estequiométrica de carbono en una retorta a 25°C . Los productos salen de la retorta a 907°C (1180K)



PREGUNTAS

1. Calcular la cantidad de calor, por kilogramo de zinc producido, que debe ser transmitido a la retorta para completar la reacción

DATOS

- Calores estándar de formación del ZnO y el CO a 25°C son $-83,2$ y $-26,42 \text{ Kcal/mol}$, respectivamente
- Calor del zinc en su punto de fusión (420°C) = $1,74 \text{ Kcal/mol}$
- Calor de evaporación del zinc en su punto normal de ebullición (907°C) = $27,3 \text{ Kcal/mol}$
- $C_p, \text{Zn} = 5,35 + 2,40 \times 10^{-5} T \text{ cal/mol.K}$ (rango 25°C a 420°C) y $7,75 \text{ cal/mol.K}$ (rango 420°C a 927°C)
- $C_p, \text{CO} = 6,8 + 0,98 \times 10^{-5} T \text{ cal/mol.K}$ (rango: 25°C a 2227°C)
- Peso atómico del zinc = $65,38$

SOLUCION

Esta cantidad de calor se calcula así.

$$\Delta H^{\circ}_{180} = \Delta H^{\circ}_{298} + n_{Zn} \int_{298}^{693} C_{p,Zn(s)} dT + n_{Zn} 1,74 \times 1000 + n_{Zn} \int_{693}^{1180} C_{p,Zn(l)} dT + 27,3 \times 1000 +$$

$$n_{CO} \int_{298}^{1180} C_{p,CO} dT$$

$$\Delta H^{\circ}_{298} = \sum H^{\circ}_{298, \text{prod.}} - \sum H^{\circ}_{298, \text{react.}}$$

Estequiometria

Para 1 Kg. de Zn = 1000 g. = 15,295 g.-mol
 ZnO = 15,295 g.-mol = CO = C(gr.)

$$\Delta H^{\circ}_{298} = 15,295 \times (-26,42 + 83,2) = 868,734 \text{ cal.}$$

Para llevar el Zn desde 298K a 1180K, se necesitan

$$\Delta H_{180,Zn} = 15,295 \int_{298}^{693} (5,35 + 2,40 \times 10^{-3} T) dT + 15,295 \times 1740 +$$

$$15,295 \int_{693}^{1180} 7,75 dT + 15,295 \times 27300 = 541578 \text{ cal} = 541,578 \text{ Kcal}$$

Para llevar el CO desde 298K hasta 1180K, se necesitan

$$\Delta H_{180,CO} = 15,295 \int_{298}^{1180} (6,8 + 0,98 \times 10^{-3} T - 0,11 \times 10^{-5} T^2) dT =$$

$$101081 \text{ cal} = 101,081 \text{ Kcal.}$$

$$\Delta H^{\circ}_{180, \text{reaccion}} = 868,734 + 541,578 + 101,081 = 1511,393 \text{ Kcal}$$

$$\Delta H^{\circ}_{180, \text{reacción}} = 1511,4 \text{ Kcal/Kg. de Zn. (36-1)}$$

EJERCICIO N°37 (11)

1. Calcular el cambio de entalpia de la siguiente reaccion a 1097°C (1370K)



DATOS

- Calor estándar de formación del CuCl a 25°C (298K) = 32,2 Kcal/mol
- Calores de fusión del Cu y CuCl = 3,1 y 2,45 Kcal/mol, respectivamente
- Puntos de fusión del Cu y el CuCl = 1083°C (1356K) y 430°C (703K), respectivamente
- $C_{p,Cu,s} = 5,41 + 1,50 \times 10^{-3} T$ (rango: 25°C a 1083°C) y $C_{p,Cu,l} = 7,50 \text{ cal/mol.K}$ (rango: 1083°C a 1327°C)
- $C_{p,CuCl,s} = 5,87 + 19,20 \times 10^{-3} T$ (rango: 25°C a 430°C) y $C_{p,CuCl,l} = 15,80 \text{ cal/mol.K}$ (rango: 430°C a 1097°C).
- $C_{p,Cl_2} = 8,82 + 0,06 \times 10^{-3} T - 0,68 \times 10^{-5} T^2 \text{ cal./mol.K}$ (rango: 25°C a 2727°C)

SOLUCION

Reaccion



$$\Delta H_{1770}^\circ = \Delta H_{1798}^\circ + \int_{1798}^{1770} \Delta C_p dT + \Delta H_{1798}^\circ + \int_{1798}^{1350} \Delta C_p dT + \Delta H_{1350}^\circ + \int_{1350}^{1170} \Delta C_p dT$$

$$\Delta H_{1798}^\circ = -32.2 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta C_p = \sum C_{p, \text{product}} - \sum C_{p, \text{react}}$$

$$\Delta C_p^I = C_{p, \text{CuCl(s)}} - \frac{1}{2} C_{p, \text{Cl}_2} - C_{p, \text{Cu(s)}}$$

$$\Delta C_p^I = -3.95 + 17.67 \times 10^{-3} T + 0.34 \times 10^{-5} T^2$$

$$\Delta C_p^{II} = C_{p, \text{CuCl(l)}} - \frac{1}{2} C_{p, \text{Cl}_2} - C_{p, \text{Cu(s)}}$$

$$\Delta C_p^{II} = 5.98 - 1.53 \times 10^{-3} T + 0.34 \times 10^{-5} T^2$$

$$\Delta C_p^{III} = C_{p, \text{CuCl(l)}} - \frac{1}{2} C_{p, \text{Cl}_2} - C_{p, \text{Cu(l)}}$$

$$\Delta C_p^{III} = 3.89 - 0.03 \times 10^{-3} T + 0.34 \times 10^{-5} T^2$$

$$\int_{1798}^{1770} \Delta C_p^I dT = \int_{1798}^{1770} (-3.95 + 17.67 \times 10^{-3} T + 0.34 \times 10^{-5} T^2) dT = 2048 \text{ cal/mol}$$

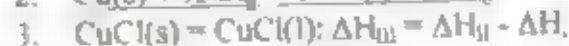
$$\int_{1350}^{150} \Delta C_p^{II} dT = \int_{1350}^{150} (5.98 - 1.53 \times 10^{-3} T + 0.34 \times 10^{-5} T^2) dT = 2900 \text{ cal/mol}$$

$$\int_{1350}^{1170} \Delta C_p^{III} dT = \int_{1350}^{1170} (3.89 - 0.03 \times 10^{-3} T + 0.34 \times 10^{-5} T^2) dT = 54.14 \text{ cal/mol}$$

Hay que tomar en cuenta que el CuCl funde antes que el Cu. Por tanto, sus calores latentes en el sumatorio a llevan signo contrario por ser producto de estas reacciones



En este caso, debido a que el CuCl se funde antes que el Cu, tendríamos



Cuando funde el Cu



Ordenando



Termodinámicamente se comprende que: $\Delta H_I < \Delta H_{II} < \Delta H_{IV}$

$\Delta H_{III} = (+)$ y $\Delta H_V = (-)$, por tanto

$$\Delta H_{1770}^\circ = -32.2 + 2048 + 2.45 + 2.9 - 3.1 + 0.54 = -27.848$$

$$\Delta H_{1770}^\circ = -27.848 \text{ Kcal (37-1)}$$

EJERCICIO N°38 (11)

PREGUNTAS

1. Calcular el calor requerido, por kilogramo, para elevar la temperatura de la chatarra de acero de 25°C (298K) a 1600°C (1873K), a partir de los siguientes datos para el hierro

- El hierro realiza transformaciones en estado sólido a 760° 910° y 1400°C (1033, 1183 y 1673K), con calores de formación de 326, 215 y 165 cal/mol, respectivamente
- El punto de fusión del hierro es de 1537°C (1810K) y su calor de fusión es de 3670 cal/mol.
- Rangos de temperatura

	C_p, Fe	
25 a 760°C	$3,0 + 7,58 \times 10^{-3}T + 0,6 \times 10^{-5}T^2$ cal. mol K	
769 a 910°C	11,13	"
910 a 1400°C	$5,80 + 2,0 \times 10^{-3}T$	"
1400 a 1537°C	$6,74 + 1,64 \times 10^{-3}T$	"
1537 a 2700°C	$9,77 + 0,40 \times 10^{-3}T$	"
- Peso atómico del hierro = 55,85

SOLUCION

El cambio de entalpia para la chatarra (Fe) en el rango de temperaturas entre 25°C (298K) y 1600°C (1873K), en el cual se realizan todos los cambios alitrópicos del estado sólido al igual que la fusión del hierro como lo plantea el enunciado con sus datos, se puede calcular mediante la siguiente ecuación

$$\Delta H_{1873}^{\circ} = n_{Fe} \left[\int_{298}^{1033} (3,0 + 7,58 \times 10^{-3}T + 0,6 \times 10^{-5}T^2) dT + 326 \right] +$$

$$n_{Fe} \left[\int_{1033}^{1183} 11,13 \cdot dT + 215 \right] +$$

$$n_{Fe} \left[\int_{1183}^{1673} (5,80 + 2,0 \times 10^{-3}T) dT + 165 \right] +$$

$$n_{Fe} \left[\int_{1673}^{1810} (6,74 + 1,64 \times 10^{-3}T) dT + 3670 \right] +$$

$$n_{Fe} \int_{1810}^{1873} (9,77 + 0,40 \times 10^{-3}T) dT =$$

$$155,85 (6056 + 326 + 1670 + 215 + 4241 + 165 + 1315 + 3670 + 662) = 328$$

$$\Delta H_{1873}^{\circ} = 328 \text{ Kcal/Kg. de Fe. (38-1)}$$

EJERCICIO N°39 (11)

Titanio (α) se transforma en titanio (β) a 882°C (1155K), con un calor de transformación igual a 830 cal/mol

PREGUNTAS

Calcular el calor de reacción cuando en titanio (β) es oxidado por oxígeno puro para formar TiO_2 a 1400°C (1673K)

DATOS

$$\begin{aligned}\text{Ti}(\alpha) + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{TiO}_2: \Delta H_{298}^\circ = -225,5 \text{ Kcal/mol} \\ C_{p, \text{Ti}(\alpha)} &= 5,28 + 2,4 \times 10^{-3} T \quad \text{cal/mol.K} \\ C_{p, \text{Ti}(\beta)} &= 6,91 \\ C_{p, \text{TiO}_2} &= 18,0 + 0,28 \times 10^{-3} T - 4,35 \times 10^{-5} T^2 \quad \text{"} \\ C_{p, \text{O}_2} &= 7,16 + 1,0 \times 10^{-3} T - 0,4 \times 10^{-5} T^2 \quad \text{"}\end{aligned}$$

SOLUCION

La reacción sería



El cálculo de calor de esta reacción se haría mediante la siguiente ecuación

$$\Delta H_{1673}^\circ = \Delta H_{298}^\circ + \int_{298}^{1155} \Delta C_p' dT + 830 + \int_{1155}^{1673} \Delta C_p'' dT$$

$$\Delta C_p' = C_{p, \text{TiO}_2} - C_{p, \text{Ti}(\alpha)} - C_{p, \text{O}_2} = 5,56 - 3,12 \times 10^{-3} T - 3,95 \times 10^{-5} T^2$$

$$\Delta C_p'' = C_{p, \text{TiO}_2} - C_{p, \text{Ti}(\beta)} - C_{p, \text{O}_2} = 3,93 - 0,72 \times 10^{-3} T - 3,95 \times 10^{-5} T^2$$

Integrando

$$\int_{298}^{1155} \Delta C_p' dT = 1839 \text{ cal/mol}$$

$$\int_{1155}^{1673} \Delta C_p'' dT = 1402,5 \text{ cal/mol}$$

$$\begin{aligned}\Delta H_{1673}^\circ &= -225,5 + 1839/1000 + 830/1000 + 1402,5/1000 = -221,43 \\ \Delta H_{1673}^\circ &= -221,43 \text{ Kcal/mol. (39-1)}\end{aligned}$$

EJERCICIO N°40 (9)

5000 pies cúbicos por minuto de un gas cuyo análisis es 80% N_2 , 15% CO_2 y 5% H_2O han de ser enfriados desde 1400°F hasta 600°F por un aspersor de agua, instalado dentro del conducto de gas caliente.

El agua se introduce a 60°F y toda se evapora en la corriente principal del gas.

PREGUNTAS

1. El requerimiento de agua, en galones por minuto.
2. El porcentaje de humedad en el gas enfriado.

SOLUCION

Vamos a calcular el contenido de calor de los gases a diferentes temperaturas

Gas

$$\begin{aligned} N_2 &= 5000 \times 0.8 = 4000 \text{ ft}^3/\text{min} \\ CO_2 &= 5000 \times 0.15 = 750 \text{ ft}^3/\text{min} \\ H_2O &= 5000 \times 0.05 = 250 \text{ ft}^3/\text{min} \end{aligned}$$

1 libra - mol de gas ocupa 359 ft

$$\begin{aligned} N_2 &= 4000/359 = 11.142 \text{ lb. - mol} \\ CO_2 &= 750/359 = 2.089 \text{ lb. - mol} \\ H_2O &= 250/359 = 0.696 \text{ lb. - mol} \end{aligned}$$

Contenido de calor en el gas a 1400°F

$$H_1 - H_{11} = \text{BTU/lb. - mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Para el } N_2 &= 11.142 \times 9720 = 108300 \text{ BTU} \\ CO_2 &= 2.089 \times 15200 = 31753 \text{ BTU} \\ H_2O &= 0.696 \times 11800 = 8213 \text{ BTU} \\ \text{Total contenido de calor a } 1400^\circ\text{F} &= 148266 \text{ BTU} \end{aligned}$$

Contenido de calor del gas a 600°F

$$\begin{aligned} \text{Para el } N_2 &= 11.142 \times 3680 = 41003 \text{ BTU} \\ CO_2 &= 2.089 \times 5340 = 11155 \text{ BTU} \\ H_2O &= 0.696 \times 4340 = 3021 \text{ BTU} \\ \text{Total contenido de calor a } 600^\circ\text{F} &= 55179 \text{ BTU} \end{aligned}$$

$$\text{Calor perdido por el gas, al pasar de } 1400^\circ\text{F a } 600^\circ\text{F} = 148266 - 55179 = 93087 \text{ BTU/min}$$

Sea X = peso del agua asperjada (libras)

$$\text{A } 600^\circ\text{F, el calor de esta agua es} = (X/18) \times 4340 = 241.111X \text{ (BTU)}$$

Calor específico medio del agua líquida = 1.0 BTU/lb.°F

$$\text{Contenido de calor del agua a } 60^\circ\text{F} = X \times 1 \times 60 = 60X \text{ (BTU/lb.)}$$

Calor de evaporación del agua = 586 Kcal/Kg

$$\text{Calor de evaporación del H}_2\text{O} = 586 \text{ (Kcal/Kg)} \times (\text{BTU } 0,252 \text{ Kcal)} \times (0,4536 \text{ Kg/lb}) = 1054,8 \text{ BTU/lb}$$

Se supone que el calor de evaporación, ya está incluido en el valor de $H_{\text{gas}} - H_{\text{liq}}$

$$\text{Calor ganado por el agua al pasar de } 60^\circ\text{F a } 600^\circ\text{F} = 241,111X + 60X = 301,111X \text{ (BTU/lb.)}$$

Este mismo calor fue el que perdió el gas, por tanto
 $301,111X \text{ (BTU/lb)} = 93087 \text{ BTU/min}$

$$X = 93087/301,111 = 309,145 \text{ lb/min}$$

$$1 \text{ ft}^3 = 7,48 \text{ galones}$$

$$H_2\text{O} = 309,145 \text{ (lb/min)} \times (1 \text{ mol } 18 \text{ lb}) \times (359 \text{ ft}^3 \text{ 1 mol}) \times (7,48 \text{ galones/ft}^3) = 46120 \text{ galones/min}$$

$$\text{Requerimiento de agua} = 46120 \text{ galones / min. (40-1)}$$

El gas enfriado ahora es.

$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= 4000 \text{ ft}^3 \\ \text{CO}_2 &= 750 \text{ ft}^3 \\ \text{H}_2\text{O} &= 250 + 309,145 \cdot (359,18) = 6416 \text{ ft}^3 \\ \text{Total gas} &= 11166 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 6416/11166 = 0,5746$$

$$\text{H}_2\text{O en gas enfriado} = 57,46\% \text{ (40-2)}$$

EJERCICIO N°41 (9)

ZnO y C (gr.), en cantidades estequiométricamente equivalentes, se cargan en frío (77°F) dentro de una retorta y se calientan a 2400°F .
 Se produce la reacción siguiente, saliendo de la retorta vapores de zinc y CO



PREGUNTAS

- 1 La cantidad de calor requerido para llevar los reactantes a 2400°F , en BTU por libra de zinc
- 2 La cantidad de calor a suministrar a la retorta a 2400°F para efectuar la reacción

SOLUCION

1
 Cálculos estequiométricos

$$\begin{aligned} \text{Zn} &= 1 \text{ libra} = 1/65,4 = 0,0153 \text{ lb-mol} \\ \text{ZnO} &= 1 \times (81,4/65,4) = 1,245 \text{ lbs.} = 0,0153 \text{ lb-mol} \\ \text{C} &= 12/65,4 = 0,1835 \text{ lbs.} = 0,0153 \text{ lb-mol} \\ \text{CO} &= 28/65,4 = 0,428 \text{ lbs.} = 0,0153 \text{ lb-mol} \end{aligned}$$

Las tablas (9) traen los valores para $H_1 - H_{77}$ en BTU. lb-mol.

$$H_{2400} - H_{77}$$

$$\text{Para ZnO} = 28800 \times 0.0153 = 440.64$$

$$\text{C (gr.)} = 0.0153 \times 10800 = 165.24$$

$$\text{Calor requerido} = 440.64 + 165.24 = 605.88$$

$$\text{Calor requerido para elevar los reactantes a } 2400^\circ\text{F} = 605.88 \text{ BTU/lb. de Zn (41-1)}$$

Calores de formación

$$\text{ZnO} = 83.17 \times 1800 = -149706 \text{ BTU/lb-mol}$$

$$\text{CO} = 26.42 \times 1800 = -47756 \text{ "}$$

$$\Delta H, \text{ reacción} = 0.0153 \times (-47756 + 149706) = 1560 \text{ BTU/lb. de Zn}$$

$$\text{Calor a suministrar} = 1560 + 606 = 2166$$

$$\text{Calor a suministrar a la retorta para realizar la reacción} = 2166 \text{ BTU/lb. de Zn. (41-2)}$$

CAPITULO VII
EL ALTO HORNO

EJERCICIO N°1 (7)

Un mineral de hierro es reducido en un alto horno de acuerdo con la siguiente ecuación



El CO necesario es obtenido por la combustión del coque en el fondo del horno. El coque contiene 90% C, del cual el 4% es absorbido por el hierro reducido y el 86% es quemado a CO, no se forma CO₂ en la combustión.

PREGUNTAS

- 1 El volumen de CO necesario para reducir una tonelada métrica de hierro, tal como es requerido por la ecuación.
- 2 El peso teórico de coque requerido para reducir una tonelada métrica de hierro
3. El volumen de aire utilizado en quemar esta cantidad de coque
- 4 El volumen y composición, (%), de los gases formados en la combustión
- 5 El volumen y composición, (%), de los gases resultantes de la combustión, mas los que resultan de la reducción.
- 6 El volumen de aire utilizado por tonelada de coque, medido a 600°C y 1800 mm de presión total

SOLUCION

$$\begin{aligned} 1 \\ \text{Fe} &= 1000 \text{ Kg.} \\ \text{CO} &= 1000 \cdot (9 \times 22,4 / 2 \times 56) = 1800 \text{ m}^3 \\ \text{CO necesario} &= 1800 \text{ m}^3 / \text{ton. de Fe. (1-1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2 \\ \text{C en CO} &= 1800 \cdot (12 / 22,4) = 964,3 \text{ Kg.} \\ \text{Coque} &= 964,3 / 0,86 = 1121,3 \text{ Kg} \\ \text{Coque} &= 1121,3 \text{ Kg. / ton. de Fe. (1-2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \\ \text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &\rightarrow \text{CO} \\ \text{O}_2 &= 1800 / 2 = 900 \text{ m}^3 \\ \text{Aire} &= 900 / 0,21 = 4285,7 \text{ m}^3 \\ \text{Aire} &= 4285,7 \text{ m}^3 \text{ (1-3)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4 \\ \text{Gases P.C} &= \text{CO} + \text{N}_2 \end{aligned}$$

Volumen y composición de los gases P.C. (1-4)

CO	= 1800,0 m ³	= 34,7%
N ₂	4285,7 - 900 = 3385,6 m ³	= 65,3%
Gas total	= 5185,7 m ³	100,0%

$$\begin{aligned} 5 \\ \text{Gases P.C + reducción} &= \text{N}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 \end{aligned}$$

Volumen y composición de estos gases: (1-5)

$$\begin{aligned}
 N_2 &= 3385,7 \text{ m}^3 = 64,3\% \\
 CO &= 1800 \cdot (6/9) = 1200,0 \text{ m}^3 = 23,1\% \\
 CO_2 &= 1800 \cdot (3/9) = 600,0 \text{ m}^3 = 11,6\% \\
 \text{Total gases} &= 5185,7 \text{ m}^3 = 100,0\%
 \end{aligned}$$

$$\text{Coque} = 1000 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO = 1000 \times 0,86 = 860 \text{ Kg.}$$



$$\begin{aligned}
 O_2 &= 860 (22,4/24) = 803 \text{ m}^3 \\
 \text{Aire a C.N.} &= 803/0,21 = 3824 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Cambio de condiciones

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 1800 \text{ mm} \\
 T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 600 + 273 = 873 \text{ K} \\
 V &= 3824 \text{ m}^3 & V_2 &=?
 \end{aligned}$$

$$V_2 = V_1 \times (P_1/T_1) \times (T_2/P_2) = 5163 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire a C.D} = 5163 \text{ m}^3/\text{ton. de coque. (1-6)}$$

EJERCICIO N°2 (7)

Un alto horno produce un arrabio que contiene

C	3,6%
Si	1,4
Fe	95,0

El mineral contenía:

Fe ₂ O ₃	80%
SiO ₂	12
Al ₂ O ₃	8

El coque (1 kilogramo por kilogramo de arrabio), contenía:

SiO ₂	10%
C	90

El fundente (0,40 kilogramos por kilogramo de arrabio) era CaCO₃ puro
 El gas contenía 28%CO y 12%CO₂

PREGUNTAS

Por tonelada de arrabio producido

1. peso del mineral utilizado
2. peso de la escoria producida.
3. volumen del gas del alto horno

SOLUCION

1
Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,95 = 950 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en mineral} = 80 \cdot (112/160) = 56\%$$

$$\text{Mineral} = 950/0,56 = 1696 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del mineral} = 1696 \text{ Kg./ton. de arrabio (2-1)}$$

2
Escoria = $\text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$

$$\text{SiO}_2 \text{ en mineral} = 1696 \times 0,12 = 203,4 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en coque} = 1000 \times 0,1 = 100,0 \text{ Kg}$$

$$\text{Total SiO}_2 \text{ cargado} = 203,4 + 100 = 303,4 \text{ Kg}$$

$$\text{Si en arrabio} = 1000 \times 0,014 = 14 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducida} = 14 \cdot (60/28) = 30 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en escoria} = 303,4 - 30 = 273,4 \text{ Kg}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ cargada} = 1000 \times 0,4 = 400 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO de esta} = 400 \cdot (56/100) = 224 \text{ Kg}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 1696 \times 0,08 = 135,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria} = 273,4 + 135,6 + 224 = 633 \text{ kg}$$

$$\text{Escoria producida} = 633 \text{ Kg./ton. de arrabio (2-2)}$$

3
Gas producido = $\text{N}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2$

Para el calculo del volumen del gas, utilicemos la siguiente expresi3n

$$\text{Volumen del gas} = \frac{C \text{ total en gas}}{C \text{ m}^3 \text{ de gas}} \quad (1)$$

$$C \text{ total en gas} = C \text{ en coque} + C \text{ en CaCO}_3 - C \text{ en arrabio}$$

$$C \text{ en coque} = 1000 \times 0,9 = 900 \text{ Kg}$$

$$C \text{ en CaCO}_3 = 400 \cdot (12/100) = 48 \text{ Kg}$$

$$C \text{ en arrabio} = 1000 \times 0,036 = 36 \text{ Kg}$$

$$C \text{ total en gas} = 900 + 48 - 36 = 912 \text{ Kg}$$

Supongamos 1 m³ de gas

$$C \text{ en CO} = 1 \times 0,28 = 0,28$$

$$C \text{ en CO}_2 = 1 \times 0,12 = \frac{0,12}{0,40}$$

$$C \text{ en gas} = 0,40 \cdot (12/22,4) = 0,214 \text{ Kg/m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 912 \text{ Kg./}0,214 \text{ (Kg./m}^3\text{)} = 4262 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas} = 4262 \text{ m}^3 \text{ (2-3)}$$

EJERCICIO N°3 (7)

Un alto horno utiliza mineral y produce un arrabio de la siguiente composición:

Mineral		Arrabio	
Fe-O ₂	84%	Fe	94,0%
SiO ₂	9	Si	2,2
Al ₂ O ₃	3	C	3,8
H ₂ O	4		

El fundente (50 libras por 100 libras de arrabio) es

CaCO ₃	95%
SiO ₂	5

El coque (90 libras por 100 libras de arrabio) es

C	84%
SiO ₂	10
Al ₂ O ₃	3
H ₂ O	3

El análisis de los gases (secos)

CO	27%
CO ₂	14
N ₂	59

Asumir que no hay hierro en la escoria.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral fundido, por tonelada corta de arrabio
2. El peso de escoria producida, por tonelada de arrabio
3. El volumen de los gases del alto horno (incluyendo la humedad), por tonelada de arrabio
4. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas.

SOLUCION

1 tonelada corta = 2000 libras

Peso del Fe en mineral = peso del Fe en arrabio

Fe en arrabio = $2000 \times 0,94 = 1880$ lbs.

Fe en mineral = $84 - (112/160) = 58,8\%$

Mineral = $1880/0,588 = 3197,3$ lbs

Peso del mineral = 3197,3 libras (3-1)

2
Escoria = SiO₂ + Al₂O₃ + CaO

SiO₂ en mineral = $3197,3 \times 0,09 = 288$ lbs

Fundente = $2 \times 50 \times 3197,3/100 = 6394,6$ lbs

SiO₂ en escoria = $6394,6 \times 0,05 = 319,73$ lbs

Al₂O₃ en escoria = $6394,6 \times 0,03 = 191,84$ lbs

CaO en escoria = $6394,6 \times 0,92 = 5883,03$ lbs

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 44 \cdot (60/28) = 94 \text{ lbs.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en escoria} = 288 + 50 + 180 - 94 = 424 \text{ lbs.}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en mineral} = 0,03 \times 3197,3 = 96 \text{ lbs}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en coque} = 0,03 \times 1800 = 54 \text{ lbs.}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en escoria} = 96 + 54 = 150 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaCO}_3 = 1000 \times 0,95 = 950 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaO de este} = 950 \cdot (56/100) = 532 \text{ lbs}$$

$$\text{Escoria} = 424 + 150 + 532 = 1106 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 1106 \text{ lbs. (3-2)}$$

3.

Para el cálculo de los gases secos, utilizamos la ecuación (1):

$$\text{C total en gas} = \text{C en coque} + \text{C en CaCO}_3 - \text{C en arrabio:}$$

$$\text{C en coque} = 1800 \times 0,84 = 1512 \text{ lbs.}$$

$$\text{C en CaCO}_3 = 950 \cdot (12/100) = 114 \text{ lbs}$$

$$\text{C en arrabio} = 2000 \times 0,038 = 76 \text{ lbs.}$$

$$\text{C total en gas} = 1512 + 114 - 76 = 1550 \text{ lbs.}$$

Asumimos 1 ft³ de gas seco:

$$\text{C en CO} = 1 \times 0,27 = 0,27$$

$$\text{C en CO}_2 = 1 \times 0,14 = 0,14$$

$$\text{C en gas seco} = 0,41 \cdot (12/359) = 0,0137 \text{ lbs./ft}^3$$

$$\text{Gas seco} = 1550 \text{ lbs} / 0,0137 \cdot (\text{lbs./ft}^3) = 113139 \text{ ft}^3$$

Cálculo de la humedad:

$$\text{H}_2\text{O en mineral} = 0,04 \times 3197,3 = 128 \text{ lbs.}$$

$$\text{H}_2\text{O en mineral} = 128 \cdot (359/18) = 2553 \text{ ft}^3$$

$$\text{H}_2\text{O en coque} = 0,03 \times 1800 = 54 \text{ lbs.}$$

$$\text{H}_2\text{O en coque} = 54 \cdot (359/18) = 1077 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total H}_2\text{O en gas} = 2553 + 1077 = 3630 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas total} = 113139 + 3630 = 116769 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas húmedo} = 116769 \text{ ft}^3 \text{ (3-3)}$$

4.

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 113169 \times 0,59 = 66752 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 66752 \cdot (21/79) = 17744 \text{ ft}^3$$

En las toberas ocurre la siguiente reacción:



$$\text{C} = 17744 \cdot (2 \times 12/359) = 1186 \text{ lbs.}$$

$$\text{C} = 1186/1512 = 0,784$$

$$\text{C de coque quemado en las toberas} = 78,4\% \text{ (3-4)}$$

EJERCICIO N°4 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición

Fe	93,6%
Si	2,1
C	3,6
Mn	0,7

El mineral utilizado analizó lo siguiente:

Fe_2O_3	78%
SiO_2	9
Al_2O_3	5
MnO	1
H_2O	7

Asumir que todo el Fe_2O_3 es reducido a Fe.

El coque contiene 90%C y 10% SiO_2 , y se utiliza una tonelada por tonelada de arrabio

producido

El fundente es CaCO_3 puro, y se utilizó el suficiente como para producir una escoria con

45% CaO

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de mineral utilizado por tonelada de arrabio producido
2. Los porcentajes de los totales de SiO_2 y MnO que son reducidos en el horno.
3. El peso de la escoria producida por tonelada de arrabio, y su composición (%)

SOLUCION

1.

Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral

Fe en arrabio = $1000 \times 0,936 = 936 \text{ Kg}$

Fe en mineral = Fe en $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 78 \cdot (112/160) = 54,6\%$

Mineral = $936/0,546 = 1714 \text{ Kg}$

Peso del mineral utilizado = 1714 Kg. (4-1)

2.

SiO_2 en mineral = $1714 \times 0,09 = 154,26 \text{ Kg}$

SiO_2 en coque = $1000 \times 0,1 = 100,00 \text{ Kg}$

SiO_2 total cargado = $254,26 \text{ Kg}$

Si en arrabio = $1000 \times 0,021 = 21 \text{ Kg}$

SiO_2 reducido = $12 \cdot (60/28) = 45 \text{ Kg}$

SiO_2 reducido = $45/254,26 = 0,177$

SiO_2 reducido = 17,7% del total (4-2)

MnO en mineral = $1714 \times 0,01 = 17,14 \text{ Kg}$

Mn en arrabio = $1000 \times 0,007 = 7 \text{ Kg}$

MnO reducido = $7 \cdot (71/55) = 9,04 \text{ Kg}$

MnO reducido = $9,04/17,14 = 0,527$

MnO reducido = 52,7% del total (4-2)

Escoria = $\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 \text{ en escoria} &= 254,26 - 45 = 209,26 \text{ Kg.} \\
 \text{MnO en escoria} &= 17,14 - 9,04 = 8,10 \text{ Kg} \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en escoria} &= 1714 \times 0,05 = 85,70 \text{ Kg.} \\
 \text{Total escoria sin CaO} &= 303,06 \text{ Kg.} \\
 \text{Total escoria sin CaO} &= 100 - 45 = 55\% \\
 \text{Peso de la escoria} &= 303,06 / 0,55 = 551 \text{ Kg.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 551 \text{ Kg. (4-3)}$$

Composición de la escoria (4-3)

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 &= (209,26/551) \times 100 = 37,98\% \\
 \text{MnO} &= (8,1/551) \times 100 = 1,47\% \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 &= (85,7/551) \times 100 = 15,55\% \\
 \text{CaO} &= 45,00\% \\
 &= 100,00\%
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°5 (7)

El mineral de hierro utilizado en un alto horno, tenía la siguiente composición

Fe ₂ O ₃	82%
SiO ₂	14
Al ₂ O ₃	2
H ₂ O	2

Se cargaron 0,22 libras de CaCO₃ por cada libra de mineral

Se cargó una libra de coque por cada libra de arrabio producido y contenía 90%C y 10%

de residuos (R)

El horno produjo por día 600 toneladas largas de arrabio, en cual contenía 94%Fe, 4%C

y 2%Si

El análisis del gas del alto horno mostró una proporción de CO a CO₂ igual a 3/2,

análisis seco.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral cargado, por día.
2. El volumen del gas producido, por tonelada de arrabio.
3. El volumen y el peso del soplo, por tonelada de arrabio
4. El peso del carbono quemado en las toberas, por tonelada de arrabio

SOLUCION

1

$$1 \text{ tonelada larga} = 2240 \text{ libras.}$$

$$\text{Peso del Fe en arrabio} = \text{peso del Fe en mineral}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 600 \times 0,94 = 564 \text{ ton.}$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe en mineral} = 82 \cdot (112/160) = 57,4\%$$

$$\text{Mineral} = 564 / 0,574 = 983 \text{ ton}$$

$$\text{Peso del mineral cargado} = 983 \text{ ton./día. (5-1)}$$

2

$$\text{Arrabio} = 1 \text{ tonelada larga} = 2240 \text{ libras}$$

$$\text{C en coque} = 2240 \times 0,9 = 2016 \text{ lbs}$$

$$\text{Mineral cargado por tonelada de arrabio} = 2240 - (983 - 600) = 3670 \text{ libras.}$$

$$\begin{aligned}\text{CaCO}_3 &= 3670 \times 0,22 = 817,18 \text{ lbs.} \\ \text{C en CaCO}_3 &= 817,18 \cdot (12/100) = 98 \text{ lbs.} \\ \text{C en arrabio} &= 2240 \times 0,04 = 89,60 \text{ lbs.} \\ \text{C} \rightarrow \text{gas} &= 2016 + 98 - 90 = 2024 \text{ lbs.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 2024 \cdot (3/5) = 1214,4 \text{ lbs.} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 2024 - 1214,4 = 809,6 \text{ lbs.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O}_2 \text{ en CO} &= 1214,4 \cdot (16/12) = 1619 \text{ lbs.} \\ \text{O}_2 \text{ en CO}_2 &= 809,6 \cdot (32/12) = 2159 \text{ lbs.} \\ \text{Total O}_2 \text{ en gas} &= 3778 \text{ lbs.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Fe}_2\text{O}_3 &= 3670 \times 0,82 = 3009 \text{ lbs.} \\ \text{O que aporta el Fe}_2\text{O}_3 \text{ al gas} &= 3009 \cdot (48/160) = 902,7 \text{ lbs.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Si en arrabio} &= 2240 \times 0,02 = 44,8 \text{ lbs.} \\ \text{O del Si} &= 44,8 \cdot (32/28) = 51,2 \text{ lbs.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O en CaCO}_3 &= 817,18 \cdot (48/100) = 392,25 \text{ lbs.} \\ \text{CaO} &= 817,18 \cdot (52/12) = 424,88 \text{ lbs.} \\ \text{O en CaO} &= 424,88 \cdot (16/52) = 131 \text{ lbs.} \\ \text{O que aporta el CaCO}_3 \text{ al gas} &= 392 - 131 = 261 \text{ lbs.}\end{aligned}$$

$$\text{O de reducción} = 902,7 + 51,2 + 261 = 1215 \text{ lbs.}$$

$$\begin{aligned}\text{O del aire} &= 3778 - 1215 = 2563 \text{ lbs.} \\ \text{O}_2 \text{ del aire} &= 2563 \cdot (359/32) = 28754 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Cálculo del gas:} \\ \text{N}_2 &= 28754 \cdot (79/21) = 108170 \text{ ft}^3 \\ \text{CO} &= 1214,4 \cdot (359/12) = 36331 \text{ ft}^3 \\ \text{CO}_2 &= 809,6 \cdot (359/12) = 24220 \text{ ft}^3 \\ \text{H}_2\text{O} &= 3670 \times 0,02 \cdot (359/18) = 1464 \text{ ft}^3 \\ \text{Gas} &= 170185 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

$$\text{Volumen del gas} = 170185 \text{ ft}^3/\text{ton. de arrabio (5-2)}$$

$$\begin{aligned}3. \\ \text{Aire (soplo)} &= 108170 + 28754 = 136924 \text{ ft}^3 \\ \text{Volumen del soplo} &= 136924 \text{ ft}^3 (5-3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Peso del soplo} &= 2563 \cdot 0,232 = 11047 \text{ lbs.} \\ \text{Peso del soplo} &= 11047 \text{ libras (5-3)}\end{aligned}$$

$$4. \\ \text{El toberas:}$$



$$\text{C} = 2563 \cdot (24/32) = 1922 \text{ lbs.}$$

$$\text{C quemado en toberas} = 1922 \text{ libras (5-4)}$$

EJERCICIO N°6 (7)

Un mineral de hierro presenta la siguiente composicion

Fe_2O_3	76%
SiO_2	14
MnO	1
Al_2O_3	9

Este mineral es fundido en un alto horno, produciendo un arrabio de la siguiente composicion

Fe	94,2%
C	3,5
Si	1,5
Mn	0,8

Por tonelada de arrabio producido, se utilizaron 1100 kilogramos de coque con el siguiente análisis: 88%C y 12% SiO_2 .

El análisis de los gases del horno fue el siguiente 26% CO , 13% CO_2 y 61% N_2

Asumir que no pasó hierro a la escoria

PREGUNTAS

- 1 El peso de mineral necesario para producir una tonelada de arrabio.
- 2 El peso de la piedra caliza (CaCO_3 pura), por tonelada de arrabio, necesaria para producir una escoria con 36% CaO .
- 3 El volumen de los gases del horno, por tonelada de arrabio.
- 4 El volumen del soplo, calculado por el método del nitrógeno y también por el del oxígeno

SOLUCION

1

Peso del Fe en arrabio = Peso del Fe en mineral

Fe en arrabio = $1000 \times 0,942 = 942 \text{ Kg.}$

Fe en mineral = Fe en $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 76 \cdot (112/160) = 53,2\%$

Mineral = $942/0,532 = 1770 \text{ Kg.}$

Peso del mineral = 1770 Kg./ton. de arrabio (6-1)

2

Para realizar este calculo es preciso primero determinar la escoria, para a partir de ella calcular el CaO y a continuación al CaCO_3

Escoria = $\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$

SiO_2 en mineral = $1770 \times 0,14 = 247,8 \text{ Kg.}$

SiO_2 en coque = $1100 \times 0,12 = 132,0 \text{ Kg.}$

Total SiO_2 cargado = $247,8 + 132,0 = 379,8 \text{ Kg.}$

Si en arrabio = $1000 \times 0,015 = 15 \text{ Kg}$

SiO_2 reducido = $15 \cdot (60/28) = 32,1 \text{ Kg}$

$\text{SiO}_2 \rightarrow \text{escoria} = 379,8 + 32,1 = 347,7 \text{ Kg}$

MnO cargado = $1770 \times 0,01 = 17,7 \text{ Kg}$

Mn arrabio = $1000 \times 0,008 = 8 \text{ Kg.}$

MnO reducido = $8 \cdot (71/55) = 10,34 \text{ Kg}$

$\text{MnO} \rightarrow \text{escoria} = 17,7 + 10,34 = 7,36 \text{ Kg}$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{escoria} = 1770 \times 0,09 = 159,30 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 347,7 + 7,36 + 159,30 = 514,36 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 100 - 36 = 64\%$$

$$\text{Total escoria} = 514,36 / 0,64 = 803 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO} = 803 - 514 = 289 \text{ Kg}$$

$$\text{CaCO}_3 = 289 \times (100/56) = 516 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de la piedra caliza (CaCO}_3\text{)} = 516 \text{ Kg. (6-2)}$$

3

Para este cálculo vamos a utilizar la ecuación (1)

$$\text{C en coque} = 1100 \times 0,88 = 968 \text{ Kg}$$

$$\text{C en CaCO}_3 = 516 \times (12/100) = 62 \text{ Kg}$$

$$\text{C total cargado} = 1030 \text{ Kg}$$

$$\text{C en arrabio} = 1000 \times 0,035 = 35 \text{ Kg}$$

$$\text{C total en gas} = 1030 - 35 = 995 \text{ Kg}$$

Asumamos 1 m^3 de gas y calculemos la cantidad de C que contiene

$$\text{C en CO} = 1 \times 0,26 = 0,26$$

$$\text{C en CO}_2 = 1 \times 0,13 = 0,13$$

$$0,39$$

$$\text{C en gas} = 0,39 \times (12/22,4) = 0,209 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 995 \text{ Kg./}0,209 \text{ (Kg./m}^3\text{)} = 4760 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas} = 4760 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (6-3)}$$

4

Método del nitrógeno

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 4760 \times 0,61 = 2903,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 2903,6 / 0,79 = 3675 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo} = 3675 \text{ m}^3 \text{ (6-4)}$$

Método del oxígeno

$$\text{O}_2 \text{ del soplo} = \text{O}_2 \text{ en gases} \quad \text{O}_2 \text{ aportado por la carga}$$

$$\text{O aportado por el SiO}_2 \text{ reducido} = 32,1 + 15 = 17,1 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por el MnO reducido} = 10,34 - 8 = 2,34 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1770 \times 0,76 = 1345,20 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por el Fe}_2\text{O}_3 \text{ reducido} = 1345,2 \times (48/160) = 403,56 \text{ Kg}$$

$$\text{O del CaCO}_3 = 516 \times (48/100) = 247,68$$

$$\text{O del CaO} = 289 \times (16/56) = 82,5 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por CaCO}_3 = 247,68 - 82,5 = 165,18 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por la carga} = 17,1 + 2,34 + 403,56 + 165,18 = 588,18 \text{ Kg}$$

$$\text{O}_2 \text{ aportado por la carga} = 588,18 \times (22,4/32) = 412 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} = 4760 \times 0,26 = 1237,60 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = \text{CO}$$

$$\text{O}_2 = 1237,60 \times 0,5 = 618,8 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = 618,8 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = 618,8 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = 618,8 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 = 618,8 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire} = 1237,6 - 412 = 825,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 825,6/0,21 = 3931 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo} = 3931 \text{ m}^3 \text{ (6-4)}$$

EJERCICIO N°7 (7)

El mineral tratado en un alto horno contenía lo siguiente

Fe_2O_3	75,4%	Al_2O_3	4,0%
MnO	2,6	P_2O_5	1,1
SiO_2	11,0	H_2O	5,9

La composición del coque era: 88% C, 8% SiO_2 , 2% FeS y 2% H_2O

Se utilizó un fundente que contenía: 96% $CaCO_3$ y 4% SiO_2

La cantidad de coque utilizada fue de 910 kilogramos por tonelada de arrabio, y el fundente cargado fue de 330 kilogramos por tonelada de arrabio producido.

El análisis del arrabio producido fue el siguiente.

C	3,8%	P	0,7%
Si	1,2	S	0,2
Mn	0,9	Fe	93,2

99% del hierro en Fe_2O_3 fue reducido y 1% escorificado. El azufre que no entra al arrabio, pasa a la escoria como CaS

Los gases contenían 1/4 partes de CO a 1 parte de CO_2 , por volumen

PREGUNTAS

1. El peso del mineral requerido, por 1000 kilogramos de arrabio.
2. El peso de la escoria producida.
3. Los porcentajes de SiO_2 , MnO y P_2O_5 que fueron reducidos en el horno
4. El volumen del gas de alto horno, por 1000 kilogramos de arrabio

SOLUCION

1

$$\text{Fe del mineral} = \text{Fe en arrabio} - \text{Fe en FeS del coque}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,932 = 932 \text{ Kg}$$

$$\text{FeS en coque} = 910 \times 0,02 = 18,2 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en FeS} = 18,2 \times (56/88) = 11,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe del } Fe_2O_3 \text{ que va al arrabio} = 932 - 11,6 = 920,4 \text{ Kg}$$

$$\text{Total Fe en mineral} = 920,4/0,99 = 929,7 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en mineral (Fe}_2\text{O}_3) = 75,4 \times (112/160) = 52,78\%$$

$$\text{Mineral} = 929,7/0,5278 = 1762 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del mineral requerido} = 1762 \text{ Kg. (7-1)}$$

2

$$\text{Escoria} = FeO + SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + P_2O_5 + CaS + CaO$$

$$Fe \rightarrow FeO \quad 920,4 \times \frac{72}{56} = 1180,6 \text{ Kg}$$

$$Fe \text{ en escoria} = 11,6 \text{ Kg}$$

EL ALTO HORNO

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 \text{ en mineral} &= 1762 \times 0,11 = 193,82 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en coque} &= 910 \times 0,08 = 72,80 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en fundente} &= 330 \times 0,04 = 13,20 \text{ Kg} \\
 \text{Total SiO}_2 \text{ cargado} &= 279,82 \text{ Kg} \\
 \text{Si en arrabio} &= 1000 \times 0,012 = 12 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 12 \cdot (60/28) = 25,7 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en escoria} &= 279,82 - 25,7 = 254,12 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{MnO en mineral} &= 1762 \times 0,026 = 45,81 \text{ Kg} \\
 \text{Mn en arrabio} &= 1000 \times 0,009 = 9 \text{ Kg} \\
 \text{MnO reducido} &= 9 \cdot (71/55) = 11,6 \text{ Kg} \\
 \text{MnO en escoria} &= 45,81 - 11,6 = 34,21 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en escoria} = 1762 \times 0,04 = 70,48 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned}
 \text{P}_2\text{O}_5 \text{ en mineral} &= 1762 \times 0,011 = 19,38 \text{ Kg} \\
 \text{P en arrabio} &= 1000 \times 0,007 = 7 \text{ Kg} \\
 \text{P}_2\text{O}_5 \text{ reducido} &= 7 \cdot (142/62) = 16 \text{ Kg} \\
 \text{P}_2\text{O}_5 \text{ en escoria} &= 19,38 - 16 = 3,38 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{S en FeS} &= 18,2 - 11,6 = 6,6 \text{ Kg} \\
 \text{S en arrabio} &= 1000 \times 0,002 = 2 \text{ Kg} \\
 \text{S} \rightarrow \text{CaS} &= 6,6 - 2 = 4,6 \text{ Kg} \\
 \text{CaS en escoria} &= 4,6 \cdot (72/32) = 10,35 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ca en CaS} &= 10,35 - 4,6 = 5,75 \text{ Kg} \\
 \text{CaCO}_3 &= 330 \times 0,96 = 316,8 \text{ Kg} \\
 \text{Ca en CaCO}_3 &= 316,8 \cdot (40/100) = 126,72 \text{ Kg} \\
 \text{Ca} \rightarrow \text{CaO} &= 126,72 - 5,75 = 120,97 \text{ Kg} \\
 \text{CaO} &= 120,97 \cdot (56/40) = 169,5 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Escoria} &= 12 + 254,12 + 34,21 + 70,48 + 3,38 + 10,35 + 169,5 = 554,04 \text{ Kg} \\
 \text{Peso de la escoria producida} &= 554 \text{ Kg (7-2)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 25,7/279,82 = 0,092 \\
 \text{SiO}_2 \text{ reducido en el horno} &= 9,2\% \text{ (7-3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{MnO reducido} &= 11,6/45,81 = 0,253 \\
 \text{MnO reducido en el horno} &= 25,3\% \text{ (7-3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{P}_2\text{O}_5 \text{ reducido} &= 16/19,38 = 0,826 \\
 \text{P}_2\text{O}_5 \text{ reducido en el horno} &= 82,6\% \text{ (7-3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &4 \\
 \text{Gas} &= \text{N}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C en coque} &= 910 \times 0,88 = 800,8 \text{ Kg} \\
 \text{C en CaCO}_3 &= 316,8 \cdot (12/100) = 38,016 \text{ Kg} \\
 \text{C en arrabio} &= 1000 \times 0,038 = 38 \text{ Kg} \\
 \text{C} \rightarrow \text{gas} &= 800,8 + 38 - 38 = 800,8 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\text{Vamos a la relación CO:CO}_2 = 1,75:1$$

$$\begin{aligned}
 \rightarrow \text{CO} &= 800,8 \cdot \frac{1,75}{1+1,75} = 509,6 \text{ Kg} \\
 \rightarrow \text{CO}_2 &= 800,8 - 509,6 = 291,2 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$



$$O_2 \text{ del } CO = 509,6 (22,4/24) = 476 \text{ m}^3$$



$$O_2 \text{ del } CO_2 = 291,2 (22,4/12) = 544 \text{ m}^3$$

$$\text{Total } O_2 \text{ en gas} = 476 + 544 = 1020 \text{ m}^3$$

$$O \text{ aportado por } Fe_2O_3 = 920,4 (48/112) = 395 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ aportado por } MnO = 11,6 - 9 = 2,6 \text{ Kg}$$

$$O \text{ aportado por } SiO_2 = 25,7 - 12 = 13,7 \text{ Kg}$$

$$O \text{ aportado por } P_2O_5 = 16 - 7 = 9$$

$$O \text{ en } CaCO_3 = 316,8 - 38 - 126,72 = 152,08 \text{ Kg}$$

$$O \text{ en } CaO = 169,5 - 120,97 = 48,53 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ aportado por } CaCO_3 = 152,08 - 48,53 = 103,55 \text{ Kg.}$$

$$O \text{ total de reducciones} = 395 + 2,6 + 13,7 + 9 + 103,55 = 523,85 \text{ Kg.}$$

$$O_2 \text{ total de reducciones} = 523,85 (22,4/32) = 367 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del aire} = 1020 - 367 = 653 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 653 (79/21) = 2457 \text{ m}^3$$

$$H_2O \text{ en mineral} = 0,059 \times 1762 = 104,0 \text{ Kg.}$$

$$H_2O \text{ del coque} = 910 \times 0,02 = 18,2 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total } H_2O = 122,2 \text{ Kg}$$

$$\text{Total } H_2O = 122 (22,4/18) = 152 \text{ m}^3$$

$$CO = 476 \times 2 = 952 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 544 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas} = 2457 + 152 + 952 + 544 = 4105 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas del alto horno} = 4105 \text{ m}^3 (7-4)$$

EJERCICIO N°8 (7)

Un alto horno utiliza mineral de la siguiente composicion:

$$Fe_2O_3 \quad 90\% \quad SiO_2 \quad 10\%$$

Se utilizó un coque que contenia 90% C y 10% SiO₂. El fundente fue piedra caliza con 95% CaCO₃, 3% MgCO₃ y 2% SiO₂.

Se utilizó una tonelada de coque por tonelada de arrabio producido, el cual contenia 4% C, 1% Si.

Los gases producidos contenian 12% CO₂, 24% CO, 2% H₂, 2% CH₄ y 60% N₂ (análisis seco).

La escoria contenia 45% CaO + MgO; asumir que no hay hierro en la escoria.

PREGUNTAS

1. El peso necesario de la piedra caliza.
2. La cantidad de gases producidos por 100 kilogramos de arrabio.
3. El volumen de soplo (considerado seco) por 100 kilogramos de arrabio.
4. El porcentaje del carbono del coque oxidado en las toberas y por encima de estas.

EL ALTO HORNO

SOLUCION

Hay que determinar los pesos del mineral, de la escoria y del fundente, porque los componentes de la escoria provienen de estos

Determinación del peso del mineral

$$\begin{aligned}\text{Fe en mineral} &= \text{Fe en arrabio} \\ \text{Fe en arrabio} &= 100 - 4 - 1 = 95\% = 1000 \times 0,95 = 950 \text{ Kg} \\ \text{Fe en } \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 90 \cdot (112/160) = 63\% \\ \text{Peso del mineral} &= 950/0,63 = 1508 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO}$$

Sean: X = peso del fundente, Y = peso de la escoria.

$$\begin{aligned}\text{SiO}_2 \text{ en mineral} &= 1508 \times 0,1 = 150,8 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \text{ en coque} &= 1000 \times 0,1 = 100 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \text{ en fundente} &= 0,02X \\ \text{SiO}_2 \text{ total cargado} &= 150,8 + 100 + 0,02X = 251 + 0,02X \\ \text{Si en arrabio} &= 1000 \times 0,01 = 10 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 10 \cdot (60/28) = 21,4 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \rightarrow \text{escoria} &= 251 - 21,4 + 0,02X = 230 + 0,02X \\ \text{SiO}_2 \text{ en escoria} &= 100 - 45 = 55\%\end{aligned}$$

$$(1): \quad 230 + 0,02X = 0,55Y$$

$$\begin{aligned}\text{CaO en fundente} &= 0,95 \cdot (56/100) = 0,5320X \\ \text{MgO en fundente} &= 0,03 \cdot (40/84) = 0,0143X \\ \text{CaO} + \text{MgO} &= 0,5463X\end{aligned}$$

$$(2): \quad 0,5463X = 0,45Y$$

Sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned}(1): \quad 230 &= 0,55Y - 0,02X \\ (2): \quad 0 &= 0,45Y - 0,5463X\end{aligned}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, encontramos que $X = 355$
 Peso de la piedra caliza = 355 Kg./ton. de arrabio (8-1)

2

Utilizamos la expresión (1)

$$\begin{aligned}\text{C en coque} &= 100 \times 0,9 = 90 \text{ Kg} \\ \text{CaCO}_3 &= 35,5 \times 0,95 = 33,725 \text{ Kg.C} \\ \text{C en CaCO}_3 &= 33,725 \cdot (12/100) = 4,047 \text{ Kg} \\ \text{MgCO}_3 &= 35,5 \times 0,03 = 1,065 \text{ Kg} \\ \text{C en MgCO}_3 &= 1,065 \cdot (12/84) = 0,152 \text{ Kg} \\ \text{C en arrabio} &= 100 \times 0,04 = 4 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\text{C total en gas} = 90 + 4,047 + 0,152 + 4 = 98,199 \text{ Kg.}$$

Así mismo, de gas y calculamos su contenido de C

$$\text{C en gas} = 98,199 \cdot 0,0212224 = 2,0847 \text{ Kg. m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas seco} = 90,199/0,20357 = 443 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas seco} = 443 \text{ m}^3 \text{ por } 100 \text{ Kg. de arrabio (8-2)}$$

3

$$\text{N}_2 \text{ en gas seco} = 443 \times 0,6 = 265,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 265,8/0,79 = 336 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo (seco)} = 336 \text{ m}^3 \text{ por } 100 \text{ Kg. de arrabio (8-3)}$$

4.

En las toberas ocurre la siguiente reacción:



$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 336 - 265,8 = 70,2 \text{ m}^3$$

$$\text{C de este} = 70,2 \cdot (2 \times 12/22,4) = 75,5 \text{ Kg}$$

$$\text{C oxidado en las toberas} = 75,5/90 = 0,84$$

$$\text{C oxidado en las toberas} = 84\% \text{ (8-4)}$$

C oxidado por encima de las toberas = C del coque - C de arrabio - C oxidado en toberas
que reacciona con H₂O



$$\text{C de esta} = 443 \times 0,02 \cdot (12/22,4) = 4,746 \text{ Kg}$$

$$\text{C oxidado por encima de las toberas} = 90 - 75,5 - 4 - 4,746 = 5,574 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} = 5,574/90 = 0,064$$

$$\text{C oxidado por encima de las toberas} = 6,4\% \text{ (8-4)}$$

EJERCICIO N°9 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

C	4,0%
Si	1,2
Mn	0,9
Fe	93,9

El mineral tratado contenía:

Fe ₂ O ₃	80%
MnO	1
SiO ₂	12
Al ₂ O ₃	3
H ₂ O	4

Por tonelada de arrabio producido, se utilizaron 1750 kilogramos de mineral, algo del hierro se fue a la escoria como FeO

El volumen del gas producido fue de 4200 m³ por tonelada de arrabio, y su composición fue la siguiente:

CO	26%	H ₂ O	4%
CO ₂	12	N ₂	58

El coque contenía 90%C y 10%SiO₂

De fundente (CaCO₃ puro) se cargaron 480 kilogramos por tonelada de arrabio

EL ALTO HORNO

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de coque utilizados, por tonelada de arrabio.
2. La composición de la escoria (%).
3. El volumen del soplo, por tonelada de arrabio.
4. El carbono quemado por el soplo (todo a CO) y el volumen de CO formado por este.
5. El volumen de CO transformado a CO₂ en su paso a través del horno, y el porcentaje del CO₂ total en el gas que es formado de este modo.

SOLUCION

$$1. \quad C \text{ del coque} = C \text{ en gases} + C \text{ en arrabio} - C \text{ en CaCO}_3$$

$$CO = 4200 \times 0,26 = 1092 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = 4200 \times 0,12 = 504 \text{ m}^3$$

$$C \text{ en CO} = 1092 \cdot (12/22,4) = 585 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ en CO}_2 = 504 \cdot (12/22,4) = 270 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total C en gases} = 855 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ en CaCO}_3 = 480 \cdot (12/100) = 57,6 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ en arrabio} = 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ del coque} = 855 + 40 - 57,6 = 837,4 \text{ Kg.}$$

$$\text{Coque} = 837,4/0,9 = 931 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del coque} = 931 \text{ Kg./ton de arrabio (9-1)}$$

$$2. \quad \text{Escoria} = FeO + SiO_2 + MnO + Al_2O_3 + CaO$$

$$Fe_2O_3 = 1750 \times 0,8 = 1400 \text{ Kg.}$$

$$Fe \text{ en } Fe_2O_3 = 1400 \cdot (112/160) = 980 \text{ Kg.}$$

$$Fe \text{ en arrabio} = 1000 \times 0,939 = 939 \text{ Kg.}$$

$$Fe \rightarrow FeO = 980 - 939 = 41 \text{ Kg.}$$

$$FeO = 41 \cdot (72/56) = 52,7 \text{ Kg.}$$

$$SiO_2 \text{ en mineral} = 1750 \times 0,12 = 210 \text{ Kg.}$$

$$SiO_2 \text{ en coque} = 931 \times 0,10 = 93,1 \text{ Kg.}$$

$$Si \text{ en arrabio} = 1000 \times 0,012 = 12 \text{ Kg.}$$

$$SiO_2 \text{ reducido} = 12 \cdot (60/28) = 25,7 \text{ Kg.}$$

$$SiO_2 \text{ en escoria} = 210 + 93,1 - 25,7 = 277,4 \text{ Kg.}$$

$$MnO \text{ en mineral} = 1750 \times 0,01 = 17,5 \text{ Kg.}$$

$$Mn \text{ en arrabio} = 1000 \times 0,009 = 9 \text{ Kg.}$$

$$MnO \text{ reducido} = 9 \cdot (71/55) = 11,6 \text{ Kg.}$$

$$MnO \text{ en escoria} = 17,5 - 11,6 = 5,9 \text{ Kg.}$$

Composición de la escoria: (9-2)

Al ₂ O ₃	= 1750 × 0,03 = 52,5 Kg.	= 7,99%
CaO	= 480 · (56/100) = 268,8 Kg.	= 40,89%
MnO	= 5,9 Kg.	= 0,90%
SiO ₂	= 277,4 Kg.	= 42,20%
FeO	= 52,7 Kg.	= 8,02%
	657,3 Kg.	100,00%

B.
 N_2 del gas = N_2 del soplo.

$$N_2 \text{ del gas} = 4200 \times 0,58 = 2436 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 2436 / 0,79 = 3083,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo} = 3083,5 \text{ m}^3 / \text{ton. de arrabio. (9-3)}$$

II
 Todo el soplo reacciona en las toberas, mediante la siguiente reacción



$$O_2 \text{ del soplo} = 3083,5 - 2436 = 647,5 \text{ m}^3$$

$$CO = 647,5 \times 2 = 1295 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de CO formado por el soplo} = 1295 \text{ m}^3 \text{ (9-4)}$$

$$C = 647,5 \cdot (2 \times 12 / 22,4) = 693,75 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ quemado en toberas por el soplo} = 693,75 \text{ Kg. (9-4)}$$

5.
 C del coque = 837,4 Kg.
 C del arrabio = 40 Kg.
 C del coque \rightarrow gas = $837,4 - 40 = 797,4$

Si en arrabio = 12 Kg.
 $SiO_2 + 2C = Si + 2CO \therefore C = 10,3 \text{ Kg; } CO = 19,2 \text{ m}^3$

Mn. En arrabio = 9 Kg.
 $MnO + C = Mn + CO \therefore C = 2,0 \text{ Kg; } CO = 3,7 \text{ m}^3$

$$C \text{ para } Fe_2O_3 = 797,4 - 10,3 - 2,0 - 693,75 = 91,35 \text{ Kg}$$

Reducción directa:

$$Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO \therefore Fe_2O_3 = 91,35 \cdot (160 / 3 \times 12) = 406 \text{ Kg.}$$

$$FeO \text{ en escoria} = 52,7 \text{ Kg.}$$

$$Fe_2O_3 = 2FeO + \frac{1}{2} O_2$$

$$Fe_2O_3 \rightarrow \text{escoria} = 52,7 \cdot (160 / 2 \times 72) = 58,56 \text{ Kg}$$

$$Fe_2O_3 \text{ a reducir por CO} = 1400 - 406 - 58,56 = 935,44 \text{ Kg}$$



$$CO = 935,44 \cdot (3 \times 22,4 / 160) = 392,9 \text{ m}^3 = CO_2$$

$$CO \text{ transformado a } CO_2 = 392,9 \text{ m}^3 \text{ (9-5)}$$

$$CO_2 \text{ total} = 4200 \times 0,12 = 504 \text{ m}^3$$

$$CO_2 \text{ formado} = 392,9 / 504 = 0,7795$$

$$CO_2 \text{ formado por CO} = 77,95\% \text{ (9-5)}$$

EJERCICIO N°10 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición:

Fe	93,6%
Si	2,1
C	3,6
Mn	0,7

Por tonelada de arrabio producido, se cargaron al horno 1740 kilogramos de mineral de la siguiente composición:

Fe_2O_3	78%
SiO_2	9
Al_2O_3	5
MnO	1
H_2O	7

Algo del hierro no es reducido y pasa a la escoria como FeO .
El coque contiene 90% C y 10% SiO_2 y se carga una tonelada por tonelada de arrabio

producido

El fundente es CaCO_3 puro y se utilizan 360 kilogramos por tonelada de arrabio

producido

5/8 del carbono que se oxida en el horno pasan a CO y 3/8 a CO_2

PREGUNTAS

1. Los kilogramos de escoria producida, por tonelada de arrabio producido
2. Los metros cúbicos de aire utilizados, por tonelada de arrabio.
3. Los metros cúbicos de gas producidos, por tonelada de arrabio, y su composición (%).

SOLUCION

1.

$$\text{Escoria} = \text{FeO} + \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3$$

$$\text{Fe cargado} = 1740 \times 0,78 = (112/160) = 950,04 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,936 = 936 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 950,04 - 936 = 14,04 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO} = 14,04 \cdot (72/56) = 18,05 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ cargado} = 1740 \times 0,09 + 1000 \times 0,1 = 256,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Si cargado} = 256,6 \cdot (28/60) = 119,75 \text{ Kg}$$

$$\text{Si en arrabio} = 1000 \times 0,021 = 21 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ de este} = 21 \cdot (60/28) = 45 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en escoria} = 256,6 - 45 = 211,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Mn en arrabio} = 1000 \times 0,007 = 7 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO de este} = 7 \cdot (71/55) = 9,04 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO cargado} = 1740 \times 0,01 = 17,40 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO en escoria} = 17,40 - 9,04 = 8,36 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO del CaCO}_3 = 360 \times 0,56 = 201,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ del mineral} = 1740 \times 0,05 = 87 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria} = 18,05 + 211,6 + 8,36 + 201,6 + 87 = 526,61 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria producida} = 526,61 \text{ Kg/ton. de arrabio. (10-1)}$$

2

C en coque = $1000 \times 0,9 = 900 \text{ Kg}$ C en arrabio = $1000 \times 0,036 = 36 \text{ Kg}$.C del coque \rightarrow gas = $900 - 36 = 864 \text{ Kg}$.C del coque \rightarrow CO = $864 \cdot (5/8) = 540 \text{ Kg}$.C del coque \rightarrow CO₂ = $864 \cdot (3/8) = 324 \text{ Kg}$.C + $\frac{1}{2}$ O₂ = CO: O = $540 \cdot (16/12) = 720 \text{ Kg}$.C + O₂ = CO₂: O = $324 \cdot (32/12) = 864 \text{ Kg}$.Total O₂ de oxidación = $1584 \text{ Kg} = 1584 \cdot (22,4/32) = 1108,8 \text{ m}^3$

Oxígeno liberado por la carga

O del Fe₂O₃ = $1740 \times 0,78 \times (48/160) = 407,2 \text{ Kg}$.O del FeO de la escoria = $18,05 \cdot (16/72) = 4,01 \text{ Kg}$ O₂ liberado por el Fe₂O₃ = $407,2 - 4,01 = 403,19 \text{ Kg} = 282,2 \text{ m}^3$ O₂ liberado por el SiO₂ = $1000 \times 0,021 \cdot (32/28) = 24 \text{ Kg} = 16,8 \text{ m}^3$ O₂ liberado por el MnO = $1000 \times 0,007 \cdot (16/55) = 2,04 \text{ Kg} = 1,4 \text{ m}^3$ O₂ del aire = $1108,8 - 282,2 - 16,8 - 1,4 = 808,4 \text{ m}^3$ Aire = $808,4 / 0,21 = 3850 \text{ m}^3$ Aire utilizado = $3850 \text{ m}^3 / \text{ton. de arrabio (10-2)}$

3.

Gas producido: (10-3)

CO₂ = $864 \times (22,4/32) + 360 \times 0,44 \times (22,4/44) = 685 \text{ m}^3 = 14,02\%$ N₂ = $3850 \times 0,79 = 3042 \text{ m}^3 = 62,25\%$ CO = $720 \times (22,4/32) \times 2 = 1008 \text{ m}^3 = 20,63\%$ H₂O = $1740 \times 0,07 \times (22,4/18) = 152 \text{ m}^3 = 3,11\%$ Total gas = $4887 \text{ m}^3 = 100,00\%$

EJERCICIO N°11.(7)

El mineral cargado a un alto horno tenía la siguiente composición

Fe ₂ O ₃	85%
SiO ₂	11
Al ₂ O ₃	4

Por cada 1,7 kilogramos de mineral, se cargaron un kilogramo de coque (90% C y 10% R) y 0,25 kilogramos de piedra caliza (CaCO₃ puro)

El horno produjo por día 500 toneladas de un arrabio que contenía 94% Fe, 4% C y 2% Si

El volumen del soplo fue de 3150 metros cúbicos por tonelada de arrabio producido

PREGUNTAS

1. El peso del mineral cargado, por día
2. La relación CO a CO₂ en el gas del horno, por volumen
3. El porcentaje del poder total de calentamiento del coque que queda disponible en el gas
4. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas

EL ALTO HORNO

SOLUCION

1.
Peso de Fe en mineral = Peso de Fe en arrabio

$$\text{Fe en arrabio} = 0,94 \times 500 = 470 \text{ ton./dia}$$

$$\text{Fe en mineral} = 85 \cdot (112/160) = 59,5\%$$

$$\text{Mineral} = 470/0,595 = 790$$

$$\text{Mineral cargado por día} = 790 \text{ ton. (11-1)}$$

2.
 $\text{Soplo} = 3150 \times 500 = 1'575.000 \text{ m}^3/\text{día}$
 $\text{O del soplo} = 1'575.000 \times 0,21 = 330750 \text{ m}^3 = 472642 \text{ Kg}$

$$\begin{aligned} \text{Coque cargado} &= 790000/1,7 = 464706 \text{ Kg./día} \\ \text{C en coque} &= 464706 \times 0,9 = 418235 \text{ Kg} \\ \text{C en arrabio} &= 500000 \times 0,04 = 20000 \text{ Kg} \\ \text{C del coque} \rightarrow \text{gas} &= 418235 - 20000 = 398235 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Si en arrabio} &= 500000 \times 0,02 = 10000 \text{ Kg} \\ \text{O de este Si} &= 10000 \cdot (32/28) = 11429 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 790000 \times 0,85 = 671500 \text{ Kg.} \\ \text{O de este} &= 671500 - 470000 = 201500 \text{ Kg} \\ \text{Total O en gas (sin el de CaCO}_3) &= 201500 + 11429 + 472642 = 685571 \text{ Kg. día.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O} \rightarrow \text{CO en toberas} &= 398235 \cdot (16/12) = 530980 \text{ Kg} \\ \text{CO formado en toberas} &= 530980 \cdot (28/16) = 929215 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Del oxígeno total, una parte reacciona con el CO y se convierte en CO₂ en la zona de reducción indirecta



$$\begin{aligned} \text{O} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 &= 685571 - 530980 = 154591 \text{ Kg} \\ \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 &= 154591 \cdot (28/16) = 270534 \text{ Kg} \\ \text{CO}_2 \text{ formado} &= 270534 \cdot (44/28) = 425125 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Fundente} = 790000 \times (0,25/1,7) = 116177 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 &= 116177 \cdot (44/100) = 51118 \text{ Kg.} \\ \text{CO}_2 \text{ total} &= 425125 + 51118 = 476643 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO en gas final} &= 929215 - 270534 = 658681 \text{ Kg} \\ \text{CO} &= 658681 \cdot (22,4/28) = 526945 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{CO}_2 = 476643 \cdot (22,4/44) = 242451 \text{ m}^3$$

$$\text{CO/CO}_2 = 526945/242451 = 2,17$$

$$\text{CO:CO}_2 = 2,17:1 \text{ (11-2)}$$

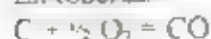
3.
 $\text{P.C.B del coque} = 418235 \times 8100 = 3387'703.500 \text{ Kcal}$
 $\text{P.C.B del gas} = 3034 \times 526945 = 1598'751.130 \text{ Kcal}$

$$\text{P.C.B del gas} = 1598'751.130/3387'703.500 = 0,4719$$

$$\text{P.C.B del gas} = 47,19\% \text{ de la del coque (11-3)}$$

4

En toberas



$$C = 330750 \times (24/22,4) = 354375 \text{ Kg}$$

$$C \text{ quemado en toberas} = 354375/418235 = 0,845$$

$$C \text{ del coque quemado en toberas} = 84,5\% \text{ del total (11-4)}$$

EJERCICIO N°12 (7)

El mineral de la siguiente composición fue procesado en un alto horno.

Fe ₂ O ₃	82%
SiO ₂	10
Al ₂ O ₃	5
H ₂ O	3

Se utilizó como fundente CaCO₃ puro, y el coque contenía 88% C, 1% H y 11% SiO₂.

Se cargaron por tonelada de mineral 600 kilogramos de coque, 120 de fundente y 2140 metros cúbicos de soplo, y se produjeron 590 kilogramos de arrabio con 95% Fe, 3,5% C y 1,5% Si.

PREGUNTAS

1. El peso y composición de la escoria producida, por tonelada de mineral
2. El volumen y composición del gas de alto horno
3. El peso del soplo utilizado por tonelada de arrabio producido, y su volumen medido a las condiciones usuales, es decir: temperatura, 600°C, presión 2000 mm, de mercurio.

SOLUCION

1



$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,82 \times 1000 = 820 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = 820 \times (112/160) = 574 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 590 \times 0,95 = 560,5 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 574 - 560,5 = 13,5 \text{ Kg.}$$

$$\text{FeO} = 13,5 \times (72/56) = 17,3 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en mineral} = 1000 \times 0,10 = 100 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en coque} = 600 \times 0,11 = 66 \text{ Kg.}$$

$$\text{Si en arrabio} = 590 \times 0,015 = 8,85 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 8,85 \times (60/28) = 19 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 100 + 66 - 19 = 147 \text{ Kg.}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 1000 \times 0,05 = 50 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO} = 120 \times (56/100) = 67,2 \text{ Kg.}$$

Peso y composición de la escoria (12-1)

$$\text{FeO} = 17,3 \text{ Kg.} = 6,5\%$$

$$\text{SiO}_2 = 147,0 \text{ Kg.} = 52,0\%$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 50,0 \text{ Kg.} = 17,6\%$$

$$\text{CaO} = \frac{67,2 \text{ Kg.}}{281,5 \text{ Kg.}} = 23,8\%$$

2

$$\text{Soplo} = 2140 \text{ m}^3$$

$$\text{O del soplo} = 2140 \times 0,21 = 449,4 \text{ m}^3 = 640 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del Fe}_2\text{O}_3 = 820 - 13,5 - 560,5 = 246 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del SiO}_2 = 19 - 8,85 = 10,15 \text{ Kg.}$$

$$\text{Total O} = 640 + 246 + 10,15 = 896,15 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en coque} = 600 \times 0,88 = 528 \text{ KG}$$

$$\text{C en arrabio} = 590 \times 0,035 = 20,65 \text{ Kg.}$$

$$\text{C del coque} \rightarrow \text{gas} = 528 - 20,65 = 507,35 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del CO} = 507,35 \times (16/12) = 677 \text{ Kg}$$

$$\text{CO} = 677 \times (28/16) = 1185 \text{ Kg.}$$

$$\text{O restante} = 896,15 - 677 = 219,15 \text{ Kg}$$

Este O forma CO_2 en reacción con CO:

$$\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 = 219,15 \times (28/16) = 384 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO en gas} = 1185 - 384 = 801 \text{ Kg.} = 641 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ formado} = 384 \times (44/28) = 602 \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 = 120 - 67,2 = 52,8 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO}_2 \text{ total} = 602 + 52,8 = 654,8 \text{ Kg.} = 333 \text{ m}^3$$

Volumen y composición del gas: (12-2)

$$\text{N}_2 = 2140 - 449,4 = 1690,6 = 61,1\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1000 \times 0,03 \times 22,4/18 = 37,4 \text{ m}^3 = 1,3\%$$

$$\text{H}_2 = 600 \times 0,01 \times (22,4/2) = 67,2 \text{ m}^3 = 2,4\%$$

$$\text{CO} = 641,0 \text{ m}^3 = 23,2\%$$

$$\text{CO}_2 = 333,0 \text{ m}^3 = 12,0\%$$

$$\text{Total gas} = 2769,2 \text{ m}^3 \quad 100,0\%$$

3

Para 1 tonelada de arrabio

$$\text{Soplo} = 2140 \times (1000/590) = 3620 \text{ m}^3 \text{ a C.N.}$$

$$\text{Peso del soplo} = 3620 \times 1,293 = 4690 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del soplo} = 4690 \text{ Kg./ton. de arrabio (12-3)}$$

Llevamos el soplo a las condiciones reales

$$P_1 = 760 \text{ mm} \quad P_2 = 2000 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K} \quad T_2 = 873 \text{ K}$$

$$V_1 = 3620 \text{ m}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 \cdot (P_1/T_1) \cdot (T_2/P_2) = 4410 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo a condiciones usuales} = 4410 \text{ m}^3 \quad (1-3)$$

EJERCICIO N°13 (7)

El siguiente mineral fue fundido en un alto horno, utilizando 3400 libras por tonelada corta de arrabio producido

Fe_2O_3	80%	Al_2O_3	3%
MnO	3	H_2O	4
SiO_2	10		

Se utilizó como fundente CaCO_3 puro, y el coque contenía 87% C, 11% SiO_2 y 2% Al_2O_3

El consumo de coque fue de 1700 libras por tonelada de arrabio, y se utilizó suficiente fundente como para producir una escoria con 34,6% de CaO

Se introdujeron 9,000 pies cúbicos de soplo por tonelada de arrabio.

El arrabio contenía

Fe	93,0%
Mn	2,0
Si	1,4
C	3,6

PREGUNTAS

1. Las libras del fundente utilizado, por tonelada de mineral
2. La composición de la escoria (%)
3. El volumen y composición del gas producido, por tonelada de arrabio
4. El porcentaje del valor de calentamiento del coque que permanece en el gas.

SOLUCION

La referencia para esta pregunta es 1 tonelada de mineral y no de arrabio, pero como todo el texto del problema está referido al arrabio, debemos determinar cuanto arrabio produce 1 tonelada corta de mineral.

$$1 \text{ tonelada corta} = 2000 \text{ libras.}$$

$$\text{Arrabio} = 2000 \cdot (2000/3400) = 1176,5 \text{ libras por tonelada de mineral.}$$

$$\text{Coque} = 1176,5 \cdot (1700/2000) = 1000$$

Debemos calcular el peso de la escoria que contiene CaO y en base a este último calcular el CaCO_3

$$\text{Escoria} = \text{FeO} + \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO.}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2000 \times 0,8 = 1600 \text{ lbs.}$$

$$\text{Fe en este} = 1600 \cdot (112/160) = 1120 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1176,3 \times 0,93 = 1094,15 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 1120 + 1094,15 = 2214,15 \text{ lbs.}$$

$$\text{FeO} = 2214,15 \cdot (72/56) = 2817,9 \text{ lbs.}$$

$$\text{MnO en mineral} = 2000 \times 0,03 = 60 \text{ lbs}$$

$$\text{Mn en arrabio} = 1176,5 \times 0,02 = 23,53 \text{ lbs}$$

$$\text{MnO reducido} = 23,53 \cdot (71/55) = 30,4 \text{ lbs}$$

$$\text{MnO en escoria} = 60 - 30,4 = 29,6 \text{ lbs}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en mineral} = 2000 \times 0,1 = 200 \text{ lbs}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en coque} = 1000 \times 0,11 = 110 \text{ lbs}$$

$$\text{Si en arrabio} = 1176,5 \times 0,014 = 16,47 \text{ lbs}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 16,47 \cdot (60/28) = 35,4 \text{ lbs}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en escoria} = 200 + 110 + 35,4 = 345,4 \text{ lbs}$$

$$\begin{aligned} \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en mineral} &= 2000 \times 0,03 = 60 \text{ lbs} \\ \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en coque} &= 1000 \times 0,02 = 20 \text{ lbs} \\ \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en escoria} &= 80 \text{ lbs} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total escoria sin CaO} &= 33,3 + 29,6 + 174,7 + 80 = 417,6 \text{ lbs.} = 65,4\% \\ \text{Escoria total} &= 417,6 / 0,654 = 638,5 \text{ lbs.} \end{aligned}$$

$$\text{CaO} = 638,5 - 417,6 = 220,9 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaCO}_3 = 220,9 \cdot (100/56) = 394,5 \text{ lbs.}$$

Fundente = 394,5 libras por tonelada de mineral (13-1)

2

Composición de la escoria (13-2):

$$\begin{aligned} \text{FeO} &= 33,3 \text{ lbs} = 5,2\% \\ \text{MnO} &= 29,6 = 4,2 \\ \text{SiO}_2 &= 274,7 = 43,0 \\ \text{Al}_2\text{O}_3 &= 80,0 = 12,5 \\ \text{CaO} &= 220,9 = 34,6\% \\ &638,5 \text{ lbs } 100,0\% \end{aligned}$$

3

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{Soplo} = 91000 \text{ ft}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ del soplo} = 91000 \times 0,21 = 19110 \text{ ft}^3$$

$$\text{O del soplo} = 19110 \cdot (32/359) = 1703,4 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3400 \times 0,8 = 2720 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 2000 \times 0,93 = 1860 \text{ lbs.}$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = 2720 \cdot (112/160) = 1904 \text{ lbs.}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 1904 - 1860 = 44 \text{ lbs}$$

$$\text{FeO} = 44 \cdot (72/56) = 56,7 \text{ lbs}$$

$$\text{O aportado por el Fe}_2\text{O}_3 = 2720 - 1860 - 56,7 = 803,3 \text{ lbs.}$$

$$\text{MnO en mineral} = 3400 \times 0,03 = 102 \text{ lbs.}$$

$$\text{Mn en arrabio} = 2000 \times 0,02 = 40 \text{ lbs.}$$

$$\text{MnO reducido} = 40 \cdot (71/55) = 51,8 \text{ lbs.}$$

$$\text{O aportado por el MnO} = 51,8 - 40 = 11,8 \text{ lbs.}$$

$$\text{Si en arrabio} = 2000 \times 0,014 = 28 \text{ lbs.}$$

$$\text{O aportado por el SiO}_2 = 28 \cdot (32/28) = 32 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total O del gas sin O del CO}_2 \text{ del CaCO}_3 = 1705 + 803,3 + 11,8 + 32 = 2552,1 \text{ lbs}$$

$$\text{C en coque} = 1700 \times 0,87 = 1479 \text{ lbs.}$$

$$\text{C en arrabio} = 2000 \times 0,036 = 72 \text{ lbs}$$

$$\text{C del arrabio} \rightarrow \text{gas} = 1479 - 72 = 1407 \text{ lbs.}$$

$$\text{O} \rightarrow \text{CO} = 1407 \cdot (16/12) = 1876 \text{ lbs.}$$

$$\text{CO total formado} = 1876 \cdot (28/16) = 3283 \text{ lbs.}$$

De este CO, una parte se convierte en CO₂ por interacción con el O. Debemos calcular cuánto O reacciona con CO para producir CO₂ y luego calcular el CO que finalmente pasa al gas

$$\text{O} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 = 2552 - 1876 = 676 \text{ lbs}$$

$$\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 = 676 \cdot (28/16) = 1183 \text{ lbs}$$

$$\text{CO} \rightarrow \text{gas} = 3283 - 1183 = 2100 \text{ lbs.} = 26925 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ formado} = 1183 \cdot (44/28) = 1859 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaCO}_3 = 394 \cdot (3400/2000) = 670 \text{ lbs}$$

$$\text{CO}_2 \text{ de este} = 670 \cdot (44/100) = 294,8 \text{ lbs.}$$

$$\text{CO}_2 \text{ total} = 1859 + 294,8 = 2153,8 \text{ lbs.} = 17573 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 = 91000 \times 0,79 = 71890 \text{ ft}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 3400 \times 0,04 = 136 \text{ lbs} = 2712 \text{ ft}^3$$

Volumen y composición del gas (13-3)

$$\text{CO} = 26925 \text{ ft}^3 = 22,6\%$$

$$\text{CO}_2 = 17573 \text{ ft}^3 = 14,8\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 2712 \text{ ft}^3 = 2,3\%$$

$$\text{N}_2 = 71890 \text{ ft}^3 = 60,3\%$$

$$\text{Total gas} = 119100 \text{ ft}^3 = 100,0\%$$

4

$$\text{Valor de calentamiento del coque (C)} = 14600 \times 14,79 = 21593400 \text{ BTU}$$

$$\text{Valor de calentamiento del gas (CO)} = 341 \times 26925 = 9181425 \text{ BTL}$$

$$\text{Valor de calentamiento del gas} = 9181425/21593400 = 0,425$$

$$\text{Valor de calentamiento del gas} = 42,5\% \text{ del de coque. (13-4)}$$

EJERCICIO N°14 (7)

Un mineral hematita de hierro contiene 78% Fe_2O_3 . Este es reducido en un alto horno, utilizando un coque que contiene 83% C.

El gas producido en el horno debe contener un exceso de CO, la ecuación de la reducción tiene la siguiente forma



Asumir que la relación $\text{CO}:\text{CO}_2$ en el gas producido es 7:4

El arrabio producido contiene: 93% Fe y 4% C

PREGUNTAS

1. La ecuación de reducción, balanceada con números enteros

2. El consumo de coque por tonelada métrica de arrabio

3. El CO para la reducción se produce quemando el carbono del coque con aire (soplo)

¿Cuántos metros cúbicos de soplo se requieren por tonelada de arrabio producido? ¿Cuántas toneladas de soplo?

SOLUCION

Reacción de reducción.



De la observación de esta ecuación se puede deducir que

$$\text{Y}/3 = 7/4 = \text{CO}/\text{CO}_2$$

$$\text{También que } \text{X} = 3 + \text{Y} = 12 + \text{Y} = 12 + 3 \cdot 4 = 24$$

La ecuación se puede ahora escribir de la siguiente manera.



Si multiplicamos por 4, tendremos.



$$\begin{aligned} \text{Fe en arrabio} &= 1000 \times 0,93 = 930 \text{ Kg.} \\ \text{C en gas} &= 930 - (33 \times 12 / 8 \times 56) = 822 \text{ Kg.} \\ \text{C en arrabio} &= 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg.} \\ \text{C total} &= 822 + 40 = 862 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

$$\text{Coque} = 862 / 0,83 = 1039 \text{ Kg.}$$

$$\text{Coque consumido} = 1039 \text{ Kg. (14-2)}$$

La reacción para producir CO



$$\text{O} = 822 \cdot (16/12) = 1096 \text{ Kg.} = 767 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 767 / 0,21 = 3652 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo requerido} = 3652 \text{ m}^3 \text{ (14-3)}$$

$$\text{Soplo} = 1096 / 0,232 = 4724 \text{ Kg.} = 4,724 \text{ ton.}$$

$$\text{Peso del soplo} = 4,724 \text{ ton. (14-3)}$$

$$\text{Gas} = \text{N}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 822 \cdot (7/11) = 523 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 822 - 523 = 299 \text{ Kg.}$$

Composición del gas (14-4)

$$\begin{aligned} \text{N}_2 &= 3652 \times 0,79 = 2885,08 \text{ m}^3 = 65,28\% \\ \text{CO} &= 523 \cdot (22,4/12) = 976,27 \text{ m}^3 = 22,09\% \\ \text{CO}_2 &= 299 \cdot (22,4/12) = 558,13 \text{ m}^3 = 12,63\% \\ \text{Total gas} &= 4419,48 \text{ m}^3 = 100,00\% \end{aligned}$$

EJERCICIO N°15 (7)

La ecuación para la reducción del Fe_2O_3 por el CO es la siguiente:



El arrabio producido contiene 94%Fe y 3,6%C. El carbono es suministrado por coque que contiene 84%C.

PREGUNTAS

1. La ecuación balanceada para la reducción, si se produce una relación $\text{CO} : \text{CO}_2 = 2:1$
2. Consumo de coque, en libras por tonelada larga de arrabio producido.

3 Si el CO para la reducción es producido por la combustión del carbono del coque con aire, ¿cuántos pies cúbicos de aire serán requeridos para producir el CO necesario para una tonelada de arrabio?

4 ¿Cuál será la composición (%) de la mezcla del gas resultante de la combustión y de la reducción combinadas?

5 Si el mineral utilizado contiene 75% Fe_2O_3 , ¿cuántas toneladas de mineral serán requeridas por tonelada de arrabio producido?

6 Si en combinación con la ecuación (1), 10% del hierro fuera reducido por carbono sólido de acuerdo con la ecuación



¿Cuál sería el consumo de coque, por tonelada de arrabio, asumiendo la misma relación de $\text{CO}:\text{CO}_2 = 2:1$ en los gases?

SOLUCION

1

De acuerdo a la reacción (1), tendremos

$$\text{CO}/\text{CO}_2 = Y/3 = 2/1 \therefore$$

$$Y = 6$$

$$\text{Por tanto: } X = Y + 3 = 9$$

La reacción para la reducción quedará: (15-1)



2

$$1 \text{ tonelada larga} = 2240 \text{ libras}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 2240 \times 0,94 = 2105,6 \text{ lbs}$$

$$\text{C en arrabio} = 2240 \times 0,036 = 80,64 \text{ lbs}$$

$$\text{C en reacción} = 2105,6 \cdot (9 \times 12 / 112) = 2030,4 \text{ lbs}$$

$$\text{C total} = 2030,4 + 80,64 = 2111,04 \text{ lbs}$$

$$\text{Coque} = 2111,04 / 0,84 = 2513,14 \text{ lbs}$$

$$\text{Coque consumido} = 2513,14 \text{ lbs/ton. de arrabio. (15-2)}$$

3.

$$\text{O de reacción} = 2030,4 \cdot (16 / 12) = 2707,2 \text{ lbs}$$

$$\text{O de reacción} = 2707,2 \cdot (359 / 32) = 30371,4 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 30371,4 / 0,21 = 144626 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire requerido} = 144626 \text{ ft}^3/\text{ton. de arrabio (15-3)}$$

4

Dado que $\text{CO}/\text{CO}_2 = 2:1$, 2/3 del C pasan a CO y 1/3 a CO_2

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 2030,4 \cdot (2/3) = 1353,6 \text{ lbs}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 2030,4 - 1353,6 = 676,8 \text{ lbs}$$

Composición del gas (15-4)

$$\text{CO} = 1353,6 \times (359 / 12) = 40495,2 \text{ ft}^3 = 21,14\%$$

$$\text{CO}_2 = 676,8 \cdot (359 / 12) = 20147,6 \text{ ft}^3 = 1,35\%$$

$$\text{N}_2 = 144626 \times 0,79 = 114254,5 \text{ ft}^3 = 65,51\%$$

$$\text{Total gas} = 40495,2 + 20147,6 + 114254,5 = 174897,3 \text{ ft}^3$$

Fe en arrabio = Fe en mineral

Fe en arrabio = 2105,6 lbs.

$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2105,6(160/112) = 3008 \text{ lbs}$

Mineral = $3008/0,75 = 4010,7 \text{ lbs.} = 4010,7/2240 = 1,79 \text{ ton.}$

Mineral = 1,79 ton./ton. de arrabio (15-5)

6.

Fe para la reacción (2) = $2105,6 \times 0,10 = 210,56 \text{ lbs.}$

C para este = $210,56(3 \times 12/112) = 68 \text{ lbs.}$

Fe para la reacción (1) = $2105,6 - 210,56 = 1895,04 \text{ lbs}$

La estequiometría de la reacción (1) debe variar al variar la cantidad de Fe.

Para 2105,6 libras de Fe, la relación $\text{CO}:\text{CO}_2 = 2:1$, entonces para 1895,04 cual será para que la relación final de estos gases siga siendo la misma?

Hagamos la siguiente regla de tres

$2105,6 \rightarrow 2$

$1895,04 \rightarrow X$

Relación = $1895,04 \times 2 / 2105,6 = 1,8:1$

$Y = 1,8 \times 3 = 5,4; X = 5,4 + 3 = 8,4$

La reacción (1) quedaría

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8,4\text{CO} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2 + 5,4\text{CO}$

$\text{C} = 1895,04(8,4 \times 12/112) = 1705,54 \text{ lbs.}$

$\text{C total} = 1705,54 + 68 + 80,64 = 1854,18 \text{ lbs.}$

Coque = $1854,18/0,84 = 2207,4 \text{ lbs.}$

Coque = 2207,4 lbs./ton de arrabio (15-6)

EJERCICIO N°16 (7)

Un alto horno trata por día 1000 toneladas de un mineral que contiene:

Fe_2O_3	80%
SiO_2	12
MnO_2	5
Al_2O_3	2
H_2O	1

Todo el Fe_2O_3 , la mitad del MnO_2 y un cuarto del SiO_2 son reducidos en el horno

El arrabio contiene 4% de carbono

Por libra de mineral se utilizan 0,2 libras de CaCO_3 y 0,5 libras de coque. El coque contiene 90% C y 10% SiO_2 . Asumir que el SiO_2 del coque se escorifica completamente

Los gases del horno contienen 24% CO y 9% CO_2 . El manganeso que pasa a la escoria lo hace como MnO .

PREGUNTAS

1. Las libras de arrabio producido por día, por tonelada de arrabio producido
2. Las libras de escoria producidas por día, por tonelada de arrabio producido.
3. Los pies cúbicos de gases producidos por día

SOLUCION

1

Carga (en libras)

$$\text{Mineral} = 1000 \times 2000 = 2'000.000$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2'000.000 \times 0,8 = 1'600.000$$

$$\text{SiO}_2 = 2'000.000 \times 0,12 = 240000$$

$$\text{MnO}_2 = 2'000.000 \times 0,05 = 100000$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 2'000.000 \times 0,02 = 40000$$

$$\text{H}_2\text{O} = 2'000.000 \times 0,01 = 20000$$

$$\text{CaCO}_3 = 2'000.000 \times 0,2 = 400000$$

$$\text{Coque} = 2'000.000 \times 0,5 = 1'000.000$$

$$\text{C} = 1'000.000 \times 0,9 = 900000$$

$$\text{SiO}_2 = 1'000.000 \times 0,1 = 100000$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1'600.000 \times (112/160) = 1'120.000$$

$$\text{MnO}_2 \text{ reducido} = 100000 \times 0,5 = 50000$$

$$\text{Mn a arrabio} = 50000 \times (55/87) = 31609,2$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 240000 \times (1/4) = 60000$$

$$\text{Si a arrabio} = 60000 \times (28,60) = 28000$$

$$96\% \text{ de arrabio} = 1'120.000 + 31609 + 28000 = 1'179.609$$

$$\text{Arrabio} = 1'179.609 / 0,96 = 1'228.759 \text{ lbs}$$

$$\text{Libras de arrabio producido por día} = 1'228.759 \text{ (16-1)}$$

2

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$$

$$\text{SiO}_2 = 240000 + 100000 - 60000 = 180000 \text{ Lbs}$$

$$\text{MnO} = 50000 \times (71/87) = 40805 "$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 40000 "$$

$$\text{CaO} = 400000 \times 0,56 = 224000 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total escoria} = 584805 \text{ lbs}$$

$$\text{Libras de escoria producida por día} = 584805 \text{ (16-2)}$$

3

Utilizando la expresion (1):

$$\text{C total en gas} = 900000 + 40000 \times 0,12 - 1'228.759 \times 0,04 = 898850 \text{ lbs.}$$

Supongamos 1 ft³ de gas para ver cuanto C contiene

$$\text{C/ft}^3 \text{ de gas} = (0,24 + 0,09) \times (12/359) = 0,011 \text{ lbs/ft}^3$$

$$\text{Gas} = 898850 / 0,011 = 81'486.654$$

$$\text{Gas producido por día} = 81'486.654 \text{ ft}^3 \text{ (16-3)}$$

EJERCICIO N°17 (7)

Un alto horno funde un mineral de la siguiente composición

Fe_3O_4	70%	P_2O_5	1%
Fe_2O_3	5	MnO_2	4
SiO_2	10	H_2O	10

El horno produce por día 900 toneladas métricas de arrabio. Se utiliza suficiente fundente como para producir una escoria que contenga 24% CaO . El fundente fue caliza pura. Por tonelada de mineral se utilizaron 0,48 toneladas de coque. El coque contiene 86% C, 9% Si y 5% H_2O . Todo el fósforo cargado, la mitad del manganeso y un quinto del silicio son reducidos y van al arrabio, el cual contiene además, por análisis, 4% C. 88% del carbono del coque es quemado en las toberas. Asumir que no hay hierro en la escoria.

PREGUNTAS

1. La composición del arrabio (%)
2. El peso del mineral fundido por día.
3. El peso del fundente utilizado por día.
4. La composición de los gases formados.

SOLUCION

I.
Determinación del peso del mineral:

Sea X = peso del mineral

$$\begin{aligned}\text{Fe}_3\text{O}_4 &= 0,70X; \text{ Fe en } \text{Fe}_3\text{O}_4 = 0,70X \cdot (168/232) = 0,50689X \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 0,05X; \text{ Fe en } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,05X \cdot (112/160) = 0,03500X \\ \text{Fe total en mineral} &= 0,54189X\end{aligned}$$

$$\text{Coque} = 0,48X$$

$$\begin{aligned}\text{SiO}_2 \text{ total cargado} &= 0,09 \times 0,48X + 0,10X = 0,1432X \\ \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 0,1432X \cdot (1/5) = 0,02864X \\ \text{Si en arrabio} &= 0,02864X \cdot (28/60) = 0,01335X\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{MnO}_2 \text{ cargado} &= 0,04X \\ \text{MnO}_2 \text{ reducido} &= 0,04X \cdot (1/2) = 0,02X \\ \text{Mn en arrabio} &= 0,02X \cdot (55/87) = 0,01265X\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{P}_2\text{O}_5 \text{ cargado} &= 0,01X \\ \text{P en arrabio} &= 0,01X \cdot (62/142) = 0,0043662X\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}96\% \text{ de arrabio} &= 0,96 \times 900 = 864 \text{ ton} \\ 864 \text{ ton} &= 0,54189X + 0,01335X + 0,01265X + 0,0043662X = 0,57225X \\ X &= 864 / 0,572 = 1511 \text{ ton} = \text{peso del mineral.}\end{aligned}$$

Composición del arrabio (17-1):

$$\begin{aligned}\text{Fe} &= 1511 \times 0,542 = 818,962 \text{ ton.} = 90,91\% \\ \text{Si} &= 1511 \times 0,01335 = 20,172 \text{ ton.} = 2,24\% \\ \text{P} &= 1511 \times 0,00437 = 6,603 \text{ ton.} = 0,73\% \\ \text{Mn} &= 1511 \times 0,01265 = 19,114 \text{ ton.} = 2,12\% \\ \text{C} &= 900 \times 0,04 = 36,000 \text{ ton.} = 4,00\%\end{aligned}$$

2

El peso del mineral ya fue determinado en el punto anterior

$$\text{Peso del mineral} = 1511 \text{ ton./día. (17-2)}$$

3

El peso del fundente lo determinaremos sobre la base de la escoria

$$\text{SiO}_2 \text{ total cargado} = 1511 \times 0,1432 = 216,37 \text{ ton}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 1511 \times 0,02864 = 43,27 \text{ ton}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 216,37 - 43,27 = 173,10 \text{ ton}$$

$$\text{MnO}_2 \text{ cargado} = 1511 \times 0,04 = 60,44 \text{ ton}$$

$$\text{MnO}_2 \rightarrow \text{MnO} = 60,44 \times (1/2) = 30,22 \text{ ton}$$

$$\text{MnO a escoria} = 30,22 \times 71/87 = 24,7 \text{ ton}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 173,10 + 24,7 = 197,8 \text{ ton.} = 76\%$$

$$\text{Peso de la escoria} = 197,8 / 0,76 = 260 \text{ ton}$$

$$\text{CaO} = 260 - 197,8 = 62,2 \text{ ton}$$

$$\text{Fundente} = \text{CaCO}_3 = 62,2 \times 100/56 = 111 \text{ ton}$$

$$\text{Peso del fundente} = 111 \text{ ton./día. (17-3)}$$

4

$$\text{Coque} = 0,48 \times 1511 = 725,28 \text{ ton}$$

$$\text{C en coque} = 725,28 \times 0,86 = 623,74 \text{ ton}$$

$$\text{C que reacciona en toberas} = 623,74 \times 0,88 = 548,89 \text{ ton}$$

Reacción en las toberas



$$\text{O} = 548,89 \times 32/24 = 731,85 \text{ ton}$$

$$\text{CO formado} = 548,89 \times 28/12 = 1280,74 \text{ ton}$$

$$\text{C del coque restante} = 623,74 - 548,89 - 36 = 38,85 \text{ ton}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = 1511 \times 0,7 = 1057,7 \text{ ton}$$

$$\text{Fe en este} = 1511 \times 0,50689 = 765,9 \text{ ton}$$

$$\text{O aportado por Fe}_3\text{O}_4 = 1057,7 - 765,9 = 291,8 \text{ ton}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1511 \times 0,05 = 75,55 \text{ ton}$$

$$\text{Fe en este} = 75,55 \times 0,035 = 2,64 \text{ ton}$$

$$\text{O aportado por el Fe}_2\text{O}_3 = 75,55 - 2,64 = 72,91 \text{ ton}$$

$$\text{O aportado por el SiO}_2 = 43,27 - 20,17 = 23,10 \text{ ton}$$

$$\text{O aportado por el MnO}_2 = (30,22 - 19,11) + (30,22 - 24,7) = 16,63 \text{ ton}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 1511 \times 0,01 = 15,11 \text{ ton}$$

$$\text{O aportado por este} = 15,11 - 6,6 = 8,51 \text{ ton}$$

$$\text{Total O de reducción} = 291,8 + 22,67 + 23,10 + 16,63 + 8,51 = 362,71 \text{ ton}$$

$$\text{O del C restante} = 38,85 \times 16/12 = 51,8 \text{ ton}$$

$$\text{CO formado} = 51,8 \times 28/16 = 90,65 \text{ ton}$$

$$\text{CO total formado} = 1280,74 + 90,65 = 1371,39 \text{ ton}$$

$$\text{O restante} = 362,71 - 51,8 = 310,91 \text{ ton}$$

$$\text{CO de este} = 310,91 \times 28/16 = 544,09 \text{ ton}$$

$$\text{CO} \rightarrow \text{gas} = 1371,39 - 544,09 = 827,3 \text{ ton}$$

$$\text{CO} \rightarrow \text{gas} = 827,3 \times 1000 \times 22,4 / 28 = 661840 \text{ m}^3$$

El CO del O restante reacciona con O para formar CO_2

$$\text{CO}_2 \text{ formado} = 544,09 \times 44 / 28 = 855 \text{ ton}$$

$$\text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 = 111 - 62,2 = 48,8 \text{ ton}$$

$$\text{CO}_2 \text{ en gas} = 855 + 48,8 = 903,8 \text{ ton}$$

$$\text{CO}_2 \text{ en gas} = 903,8 \times 1000 \times 22,4 / 44 = 460000 \text{ m}^3$$

$$\text{O del soplo} = (731,85 \times 22,4 / 32) \times 1000 = 512300 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 512300 \times 79 / 21 = 1'927.000 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O en gas} = 1000 \times (725,28 \times 0,05 + 1511 \times 0,1) \times 22,4 / 18 = 233160 \text{ m}^3$$

Composición del gas (17-4)

$$\text{CO} = 661840 \text{ m}^3 = 20,17\%$$

$$\text{CO}_2 = 460.000 \text{ m}^3 = 14,02\%$$

$$\text{N}_2 = 1'927.000 \text{ m}^3 = 58,71\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 233.160 \text{ m}^3 = 7,10\%$$

$$\text{Total gas} = 3'282.000 \text{ m}^3 = 100,00\%$$

EJERCICIO N°18 (7)

Un alto horno procesa el siguiente mineral:

Fe_2O_3	77%	SiO_2	11%
MnO	3	Al_2O_3	4
P_2O_5	3	H_2O	2

El coque tiene 90% C, 9% SiO_2 y 1% H_2O . Se utilizan 1200 libras de coque por tonelada de mineral.

El fundente utilizado (100% de CaCO_3 puro), totalizó 860 libras por tonelada de arrabio producido.

El gas del horno contenía una relación de $2 \frac{1}{2}$ partes de CO a 1 parte de CO_2 .

El horno reduce a metal todo el Fe_2O_3 , nueve decimos del MnO, todo el P_2O_5 y un quinto de todo el SiO_2 .

El arrabio contiene 4% de carbono.

PREGUNTAS

- 1 Las libras de arrabio producido a partir de una tonelada de mineral.
- 2 Las libras de escoria producida, por tonelada de arrabio.
- 3 Los pies cubicos de soplo utilizado, por tonelada de arrabio.
- 4 Los pies cubicos de gas producido, por tonelada de arrabio.

SOLUCION

Base = 1 tonelada de mineral = 2000 libras.

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2000 \times 0,77 = 1540$$

$$\text{Fe a arrabio} = 1540 \times 112/160 = 1080 \text{ libras.}$$

$$\text{MnO} = 2000 \times 0,03 = 60$$

$$\text{MnO reducido} = 60 \times 9/10 = 54$$

$$\text{Mn a arrabio} = 54 \times 55/71 = 41,8 \text{ libras}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 2000 \times 0,03 = 60$$

$$\text{P a arrabio} = 60 \times 62/142 = 26,2 \text{ libras}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en mineral} = 2000 \times 0,11 = 220$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en coque} = 1200 \times 0,09 = 108$$

$$\text{SiO}_2 \text{ total cargado} = 220 + 108 = 328$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 328 \times 1/5 = 65,6$$

$$\text{Si a arrabio} = 65,6 \times 28/60 = 30,6 \text{ libras}$$

$$96\% \text{ de arrabio} = \text{Fe} + \text{Mn} + \text{P} + \text{Si}$$

$$96\% \text{ de arrabio} = 1080 + 41,8 + 26,2 + 30,6 = 1178,6 \text{ libras.}$$

$$\text{Arrabio} = 1178,6/0,96 = 1227,7$$

Peso del arrabio = 1227,7 libras por ton. de mineral (18-1)

2

Hay que calcular la cantidad de mineral necesaria para producir 1 tonelada de arrabio.

$$\text{Mineral} = 2000 \cdot (2000/1227,7) = 3258,12 \text{ libras.}$$

$$\text{Coque} = 2000 \times (1200/1227,7) = 1954,87 \text{ libras.}$$

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$$

$$\text{MnO} = 0,03 \times 3258,12 = 97,74$$

$$\text{MnO a escoria} = 97,74 \times 1/10 = 9,774 \text{ libras}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ total} = 3258,12 \times 0,11 + 1954,87 \times 0,09 = 534,33$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 534,33 \times 4/5 = 427,46 \text{ libras}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 3258,12 \times 0,04 = 130,325 \text{ libras.}$$

$$\text{CaO} = 860 \times 56/100 = 481,6 \text{ libras.}$$

$$\text{Escoria} = 9,774 + 427,46 + 130,325 + 481,6 = 1049,16$$

Peso de la escoria = 1049,16 libras/ton. de arrabio (18-2)

3

$$\text{C en coque} = 1954,87 \times 0,09 = 1759,38$$

$$\text{C en arrabio} = 2000 \times 0,04 = 80$$

$$\text{C del coque a gas} = 1759,38 - 80 = 1679,38 \text{ libras}$$

$$\text{C en CaCO}_3 = 860 \times 12/100 = 103,2$$

$$\text{C total en gas} = 1679,38 + 103,2 = 1782,58 \text{ libras.}$$

$$\text{CO:CO}_2 = 2 \frac{1}{2} : 1 = (5/7):(2/7)$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 1782,58 (5/7) = 1273,25$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 1782,58 - 1273,25 = 509,33$$

$$\begin{aligned} \text{del CO} &= 1273,27 \times 16/12 = 1697,69 \\ \text{de CO} &= 509,55 \times 32/12 = 1358,80 \\ \text{O total de estos} &= 3056,49 \text{ libras} \end{aligned}$$

Oxígeno de las reducciones

$$\begin{aligned} \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 3258,12 \times 0,77 = 2508,75 \\ \text{O aportado por este} &= 2508,75 \times 40/160 = 752,63 \text{ libras} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 534,33 - 427,46 = 106,87 \\ \text{O aportado por este} &= 106,87 \times 32/60 = 57,2 \text{ libras} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MnO reducido} &= 97,74 - 9,774 = 87,966 \\ \text{O aportado por este} &= 87,966 \times 16/71 = 19,82 \text{ libras} \end{aligned}$$

$$\text{O aportado por CaCO}_3 = 860 - 481,6 - 103,2 = 275,2 \text{ libras}$$

$$\begin{aligned} \text{P}_2\text{O}_5 &= 3258,12 \times 0,03 = 97,74 \\ \text{O aportado por este} &= 97,74 \times 80/142 = 55 \text{ libras} \end{aligned}$$

$$\text{O total de reducciones} = 752,63 + 57,2 + 19,82 + 275,2 + 55 = 1159,85 \text{ libras}$$

$$\text{O del soplo} = 3056,49 - 1159,85 = 1896,64 \text{ libras}$$

$$\text{O del soplo} = 1896,64 \times 359/32 = 21280 \text{ ft}^3$$

$$\text{Soplo} = 21280/0,21 = 101323$$

$$\text{Soplo} = 101323 \text{ ft}^3/\text{ton. de arrabio. (18-3)}$$

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{CO} = (1273,27 + 1697,69) \times 359/28 = 38092,0 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 = (509,55 + 1358,80) \times 359/44 = 15244,0 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 = 101323 \times 0,79 = 80045,0 \text{ ft}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = (3258,12 \times 0,02 + 1954,87 \times 0,01) \times 359/18 = 1689,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total gas} = 135070,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas producido} = 135071 \text{ ft}^3/\text{ton. de arrabio (18-4)}$$

EJERCICIO N°19 (7)

Un alto horno procesa 1400 toneladas métricas por día del siguiente mineral

Fe_3O_4	68%	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	3%
Fe_2O_3	8	SiO_2	12
MnO	5	H_2O	4

Se utiliza suficiente fundente (CaCO_3) puro como para producir una escoria con 38% CaO . Se utilizan también 0,7 toneladas de coque por tonelada de mineral, el coque contiene 88% C, 8% SiO_2 y 4% H_2O .

El soplo es de 4000 metros cúbicos por tonelada de arrabio

Se redujeron las cantidades siguientes: Fe y P. 100%, Mn. 40%, SiO_2 . 22% 1 Fe
aporte e 4% de su peso en carbono

PREGUNTAS

1 El peso y composición del arrabio y la escoria y el volumen y composición del gas producido por día

SOLUCION

1

Mineral (toneladas)

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = 1400 \times 0,68 = 952$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1400 \times 0,08 = 112$$

$$\text{MnO} = 1400 \times 0,05 = 70$$

$$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 1400 \times 0,03 = 42$$

$$\text{SiO}_2 = 1400 \times 0,12 = 168$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1400 \times 0,04 = 56$$

$$\text{Coque} = 1400 \times 0,7 = 980$$

$$\text{C} = 980 \times 0,88 = 862,4$$

$$\text{SiO}_2 = 980 \times 0,08 = 78,4$$

$$\text{H}_2\text{O} = 980 \times 0,04 = 39,2$$

Arrabio

$$\text{Fe en } \text{Fe}_3\text{O}_4 = 952 \times 168/232 = 689,4$$

$$\text{O de este} = 952 - 689,4 = 262,6$$

$$\text{Fe en } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 112 \times 112/160 = 78,4$$

$$\text{O de este} = 112 - 78,4 = 33,6$$

$$\text{Total Fe cargado} = 689,4 + 78,4 = 767,8$$

$$\text{MnO reducido} = 70 \times 0,4 = 28$$

$$\text{Mn a arrabio} = 28 \times 55/71 = 21,7$$

$$\text{MnO a escoria} = 70 - 28 = 42$$

$$\text{O de este} = 28 - 21,7 = 6,3$$

$$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 3\text{Ca} + 2\text{P} + 4\text{O}_2$$

$$\text{P} = 42 \times 62/310 = 8,4$$

$$\text{CaO} = 42 \times 56/310 = 7,6$$

$$\text{O} = 42 - 8,4 - 7,6 = 26$$

$$\text{SiO}_2 \text{ total} = 168 + 78,4 = 246,4$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 246,4 \times 0,22 = 54,21$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 246,4 - 54,21 = 192,2$$

$$\text{Si a arrabio} = 54,21 \times 28/60 = 25,4$$

$$\text{O de este} = 54,21 - 25,4 = 28,81$$

$$\text{C a arrabio} = 767,8 \times 0,04 = 30,71$$

$$\text{C a gas} = 862,4 - 30,71 = 831,69$$

Peso y composición del arrabio (19-1)

Fe	= 767,80 ton.	= 89,91%
Mn	= 21,70 ton.	= 2,54%
P	= 8,40 ton.	= 0,98%
Si	= 25,40 ton.	= 2,97%
C	= 30,71 ton.	= 3,60%
Total arrabio	= 854,0 ton.	100,00%

Escoria

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{CaO}$$

$$C = 243,2 \times 12 / 100 = 29,2$$

$$O = 243,2 \times 16 / 100 = 38,8$$

$$CaO = 378 - 234,2 = 143,8$$

$$CaO \text{ del } CaCO_3 = 143,8 \times 56 = 136,2$$

$$CaCO_3 = 136,2 \times 100 / 56 = 243,2$$

$$CO \text{ de este } = 243,2 - 136,2 = 107$$

$$C \text{ de este } = 243,2 \times 12 / 100 = 29,2$$

$$O \text{ de este } = 243,2 \times 32 / 100 = 77,8$$

Peso y composición de la escoria (19-1)

$$MnO = 42,0 \text{ ton.} = 11,11\%$$

$$SiO_2 = 192,2 \text{ ton.} = 50,85\%$$

$$CaO = 143,8 \text{ ton.} = 38,04\%$$

$$\text{Total escoria} = 378,0 \text{ ton.} = 100,00\%$$

Gas (m³)

$$\text{Gas} = H_2O + CO + CO_2 + N_2$$

$$\text{Soplo} = 4000 \times 856 = 3'424.000$$

$$N_2 = 3'424.000 \times 0,79 = 2'704.960$$

$$O_2 \text{ del soplo} = 3'424.000 \times 0,21 = 719.040 \text{ m}^3 = 1'027.200 \text{ Kg}$$

$$\text{Total O} = (762,6 + 33,6 + 6,3 + 26 - 28,81) \times 1000 + 1'027.200 = 1'384.310 \text{ Kg}$$

$$O \rightarrow CO = 831,69 \times 1000 \times 16 / 12 = 1'108.800 \text{ Kg}$$

$$CO = 1'108.800 \times 28 / 16 = 1'940.540 \text{ Kg}$$

Todo este C O no pasa al gas, sino que a go reacciona con el O y pasa a CO₂

$$O \rightarrow CO \rightarrow CO_2 = 1'384.310 - 1'108.800 = 275.430 \text{ Kg}$$

$$CO \text{ de este} = 275.430 \times 28 / 26 = 482.003 \text{ Kg}$$

$$CO \text{ a gas} = 1'940.540 + 482.003 = 1'458.537 \text{ Kg} = 1'166.830 \text{ m}^3$$

$$CO_2 \text{ a gas} = 482.003 \times 44 / 28 + 107 \times 1000 = 864.633 \text{ Kg.} = 440.177 \text{ m}^3$$

$$H_2O = (56 + 39,2) \times 1000 \times 22,4 / 18 = 118.471 \text{ m}^3$$

Volumen y composición del gas (19-1)

$$H_2O = 118.471 \text{ m}^3 = 2,67\%$$

$$CO = 1'166.830 \text{ m}^3 = 26,34\%$$

$$CO_2 = 440.177 \text{ m}^3 = 9,94\%$$

$$N_2 = 2'704.960 \text{ m}^3 = 61,05\%$$

$$\text{Total gas} = 4'430.438 \text{ m}^3 = 100,00\%$$

EJERCICIO N°20 (7)

En alto horno procesa un mineral que contiene 75%Fe₂O₃ y 5%H₂O, produciendo un arrabio con 4%C y 92%Fe. Se utiliza una tonelada de coque por cada tonelada de arrabio producido, conteniendo el coque 90%C y 1%H₂O, se utilizan también 260 kilogramos de CaCO₃ por cada tonelada de arrabio

El volumen del soplo es de 350 metros cúbicos, por tonelada de arrabio

PREGUNTAS

- 1 El peso del mineral procesado para producir una tonelada de arrabio.

- 2 El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas y encima de las toberas
- 3 El volumen y composición del gas formado en las toberas, por tonelada de arrabio producido.
- 4 El volumen y composición del gas del horno
5. El porcentaje de la potencia calorífica del coque que es desarrollada en el horno

SOLUCION

1

Fe en arrabio = Fe en mineral

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,92 = 920 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en mineral} = 75 \cdot (112/160) = 52,5\%$$

$$\text{Mineral} = 920/0,525 = 1750 \text{ Kg.} = 1,75 \text{ ton}$$

$$\text{Peso del mineral} = 1,75 \text{ toneladas/ton. de arrabio (20-1)}$$

2

$$\text{Coque} = 1000 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en coque} = 1000 \times 0,9 = 900 \text{ Kg}$$

Todo el oxígeno del soplo se consume en las toberas, produciendo CO:



$$\text{O}_2 \text{ del soplo} = 3250 \times 0,21 = 682,5 \text{ m}^3$$

$$\text{C} = 682,5 \cdot (24/22,4) = 731,25 \text{ Kg}$$

$$\text{C en toberas} = 731,25/900 = 0,8125$$

$$\% \text{ del C del coque consumido en las toberas} = 81,25 \text{ (20-2)}$$

$$\text{C en arrabio} = 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg}$$

$$\text{C del coque} \rightarrow \text{gas} = 900 - 40 = 860 \text{ Kg}$$

$$\text{C quemado encima de toberas} = 860 - 731,25 = 128,75 \text{ Kg}$$

$$\text{C encima de las toberas} = 128,75/900 = 0,143$$

$$\% \text{C quemado encima de las toberas} = 14,30 \text{ (20-2)}$$

3

Gas formado en las toberas = CO + N₂

Volumen y composición del gas formado en las toberas (20-3)

$$\text{CO} = 682,5 \times 2 = 1365,0 \text{ m}^3 = 34,71\%$$

$$\text{N}_2 = 3250 \times 0,79 = 2567,5 \text{ m}^3 = 65,29\%$$

$$\text{Total gas en toberas} = 3932,5 \text{ m}^3 = 100,00\%$$

4

Gas del horno = CO + CO₂ + N₂ + H₂O

Debemos calcular el oxígeno que aporta el mineral reducido y el CO que reacciona con oxígeno para formar CO₂

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1750 \times 0,75 = 1312,5 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 1312,5 - 920 = 392,5 \text{ Kg}$$

$$\text{O del soplo} = 682,5 \cdot (32/22,4) = 975 \text{ Kg.}$$

$$\text{O total} = 975 + 392,5 = 1367,5 \text{ Kg.}$$

$$\text{O} \rightarrow \text{CO} = 860 \cdot (16/12) = 1146,7 \text{ Kg}$$

$$\text{CO total formado} = 1146,7 \cdot (28/16) = 2006,7 \text{ Kg.}$$

De este CO una parte reacciona con O y forma CO₂, el resto forma parte del gas del horno

$$\begin{aligned} \text{O} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 &= 1367,5 - 1146,7 = 220,8 \text{ Kg} \\ \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 &= 220,8 \cdot (28/16) = 386,4 \text{ Kg} \\ \text{CO} \rightarrow \text{gas} &= 2006,7 - 386,4 = 1620,3 \text{ Kg} = 1296,24 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ formado por el CO} &= 386,4 \cdot (44/28) = 607,2 \text{ Kg} \\ \text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 &= 260 \cdot (44/100) = 114,4 \text{ Kg} \\ \text{CO}_2 \text{ total en gas} &= 607,2 + 114,4 = 721,6 \text{ Kg} = 367,36 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{H}_2\text{O total} = 1750 \cdot 0,05 + 1000 \cdot 0,01 = 97,5 \text{ Kg} = 121,33 \text{ m}^3$$

Volumen y composición del gas de alto horno (20-4):

CO	= 1296,24 m ³	= 29,78%
CO ₂	= 367,36 m ³	= 8,44%
H ₂ O	= 121,33 m ³	= 2,79%
N ₂	= 2567,50 m ³	= 58,99%
Total gas	= 4352,43 m ³	= 100,00%

5.
P.C.B del coque = $8100 \times 900 - 586 \times 10 = 7'284.140 \text{ Kcal}$

P.C.B del gas (CO) = $1296,24 \times 3034 = 3'932.792 \text{ Kcal}$

P.C.B del C del arrabio = $40 \times 8100 = 324000 \text{ Kcal}$

P.C.B del coque desarrollada = $7'284.140 - 3'932.792 - 324.000 = 3'027.348 \text{ Kcal}$

P.C.B del coque desarrollada = $3'027.348 / 7'284.140 = 0,4156$

P.C.B del coque desarrollada en el horno = $41,56\%$ (20-5)

EJERCICIO N°21 (7)

Un alto horno utiliza coque de la siguiente composición

C	84%	H ₂ O	3%
H	2	R	10
O	1		

El horno produce 1 tonelada (1000 Kg) de arrabio por cada tonelada de coque utilizado, y también utiliza 400 kilogramos de CaCO₃ en la carga, por tonelada de arrabio producido. El arrabio contiene 4% de carbono.

El análisis del gas al salir del horno fue el siguiente:

CO	28%	H ₂	1%
CO ₂	16	N ₂	54
CH ₄	1		

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producidos, por tonelada de arrabio
2. La potencia calorífica del coque, por kilogramo.
3. El porcentaje de la potencia calorífica del coque que queda disponible en el gas.

SOLUCION

$$\begin{aligned}
 C \text{ en coque} &= 1000 \times 0,84 = 840 \text{ Kg} \\
 C \text{ en CaCO}_3 &= 400 \cdot (12/100) = 48 \text{ Kg} \\
 C \text{ en arrabio} &= 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg} \\
 C \text{ total en gas} &= 840 + 48 - 40 = 848 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

Supongamos 1 m³ de gas y calculemos la cantidad de C que contiene

$$C \text{ en gas} = (0,28 + 0,16 + 0,01) \times 12 \cdot 22,4 = 0,241 \text{ Kg/m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 848/0,241 = 3519 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas producido} = 3519 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio. (21-1)}$$

$$P.C.B = 8100C + 34000(H - O/8) + 2200S - 586x(9H + W)$$

$$P.C.B = 8100 \times 0,84 + 34000(0,02 - 0,01/8) + 0 - 586x(9 \times 0,02 + 0,01) = 7318,44 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del coque} = 7318 \text{ Kcal/Kg. (21-2)}$$

$$P.C.B \text{ del gas} = CO + CH_4 + H_2$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 3034 \times 0,28 + 8560 \times 0,01 + 2582 \times 0,01 = 960,94 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 960,94 \times 3519/1000 \times 7318 = 0,462$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 46,2\% \text{ de la del coque (21-3)}$$

EJERCICIO N°22 (7)

Un alto horno utiliza 2940 metros cúbicos de soplo por tonelada de arrabio producido, habiéndose precalentado este soplo a 560°C en estufas que poseen una eficiencia térmica del 70%. Para realizar esto se requiere del 28% del gas producido por el alto horno, consistiendo este gas en CO, CO₂ y N₂ y conteniendo 1,9 partes de CO por 1 parte de CO₂.

La carga incluye 320 kilogramos de CaCO₃ por tonelada de arrabio producido. El arrabio contiene 4%C. El coque utilizado tiene 86%C.

PREGUNTAS

1. El volumen y composición del gas de alto horno, por tonelada de arrabio producido
2. Los kilogramos de coque utilizados, por tonelada de arrabio
3. Del carbono en el coque, que porcentaje
 - a. Sale del horno como CO
 - b. Es utilizado en las estufas como CO
 - c. Está disponible como CO para la generación de potencia
 - d. Es quemado en las toberas

SOLUCION

$$\begin{aligned}
 &1 \\
 &\text{Precalentamiento del aire a } 560^\circ\text{C} = \\
 &2940 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} \times 560) \times 560 = 517496 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{Este calor es suministrado a una eficiencia térmica del } 70\% \\
 &\text{Calor total a estufas} = 517496/0,7 = 739281 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

En el gas, el componente combustible es el CO

Sea: X = fracción de CO en el gas

Y = fracción de CO_2 en el gas
 Z = metros cúbicos de gas.

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 2940 \times 0,79 = 2322,6 \text{ m}^3$$

$$\text{El calor producido por el gas será} = 3034X \text{ Kcal./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Los metros cúbicos de gas requeridos para producir el calor serán:}$$

$$= \frac{739281}{3034X} = \frac{243,67}{X} \text{ m}^3 \text{ de gas}$$

El volumen ocupado por el 28% del gas = $0,28Z$ Este es la cantidad de gas que produce el calor utilizado. ∴

$$0,28 \frac{243,67}{X} = \frac{243,67}{0,28X} = \frac{870,24}{X}$$

En fracciones:

$$1 = 2322,6/Z + X + Y$$

$$\text{Pero } X/Y = 1,9 \therefore Y = X/1,9 = 0,5263X, \text{ así}$$

$$1 = 2322,6/Z + X + 0,5263X = 2322,6/Z + 1,5263X$$

$$Z = 2322,6/(1 - 1,5263X)$$

Reemplazando:

$$870,24/X = 2322,6/(1 - 1,5263X)$$

$$X = 0,2384$$

$$\text{Gas} = Z = 870,24/0,2384 = 3650,85 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas de alto horno} = 3650,85 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (22-1)}$$

$$Y = 0,2384/1,9 = 0,1255$$

Composición del gas de alto horno (22-1)

$$\text{N}_2 = 2322,6/3650,85 = 63,61\%$$

$$\text{CO} = 23,84\%$$

$$\text{CO}_2 = 12,55\%$$

?

$$\text{C en gas} = \text{C en coque} + \text{C del } \text{CaCO}_3$$

$$\text{C en CO} = 3650,85 \times 0,2384 \times (12/22,4) = 466,27 \text{ Kg}$$

$$\text{C en CO}_2 = 3650,85 \times 0,1255 \times (12/22,4) = 245,45 \text{ Kg}$$

$$\text{C en CaCO}_3 = 320 \times 0,12 = 38,4 \text{ Kg}$$

$$\text{C en arrabio} = 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg}$$

$$\text{C en coque} = 466,27 + 245,45 + 40 - 38,4 = 713,32 \text{ Kg}$$

$$\text{Coque} = 713,32/0,86 = 829,44 \text{ Kg}$$

$$\text{Coque utilizado} = 829,44 \text{ Kg/ton. de arrabio. (22-2)}$$

3 a.

$$\text{C que sale del horno como CO} = 466,27 \text{ Kg}$$

$$\text{C que sale como CO}_2 = 466,27/713,32 = 0,654$$

$$\text{C que sale del horno como CO} = 65,4\% \text{ (22-3.a)}$$

3 b

$$\text{C del coque utilizado en estufas} = 466,27 \times 0,28/713,32 = 0,183$$

$$\text{C del coque utilizado en estufas} = 13,8\% \text{ (22-3.b)}$$

3 c

$$\text{disponible} = 466,27 - 466,27 \times 0,28 = 335,71 \text{ Kg.}$$

$$\eta_{\text{disponible}} = 335,71 / 713,32 = 0,471$$

$$C \text{ del coque para generación de potencia} = 47,1\% \text{ (22-3.c)}$$

3 d

Reacción en toberas.



Todo el oxígeno del soplo se consume en las toberas en la reacción anterior

$$O_2 \text{ del soplo} = 2940 \times 0,21 = 617,4 \text{ m}^3$$

$$C = 617,4 (12/11,2) = 661,5 \text{ Kg}$$

$$C \text{ del coque quemado en toberas} = 661,5 / 713,32 = 0,927$$

$$C \text{ del coque quemado en las toberas} = 92,7\% \text{ (22-3 d)}$$

EJERCICIO N°23 (7)

Un alto horno produce 400 toneladas cortas de arrabio por día, con la siguiente composición:

Fe	92,8%
Si	2,1
C	3,8
Mn	1,3

El análisis del mineral utilizado fue el siguiente:

Fe ₂ O ₃	78,0%
SiO ₂	8,2
Al ₂ O ₃	4,2
MnO	4,5
H ₂ O	5,1

Como fundente se utilizó CaCO₃ puro, en una cantidad igual a un cuarto del peso del mineral. 5% del hierro cargado se pierde en la escoria.

Se utilizaron 2100 libras de coque por tonelada de arrabio y contenía 92% C. Los gases secos contenían 17% CO₂, 28% CO y 60% N₂. El aire fue precalentado a 700°C en estufas con una eficiencia térmica del 70%.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, por tonelada de arrabio
2. El volumen del gas producido (seco), por tonelada de arrabio
3. El porcentaje del valor calorífico del coque que permanece en el gas
4. El porcentaje del gas requerido por las estufas
5. La potencia que puede ser generada por el gas remanente a una eficiencia de conversión del 20%

SOLUCION

1

$$1 \text{ tonelada corta} = 2000 \text{ libras}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 2000 \times 0,928 = 1856 \text{ libras}$$

$$\text{Fe total cargado} = 1856 / 0,95 = 1953,7 \text{ libras}$$

Sea X = peso del mineral

$$\text{Fe cargado en mineral} = 0,78X \cdot (112/160) = 0,546X$$

$$0,546X = 1953,7$$

$$X = 3578,2$$

$$\text{Mineral cargado} = 3578,2 \text{ libras/ton. de arrabio (23-1)}$$

Utilizando la expresión (1)

$$\text{CaCO}_3 = 3578,23(1/4) = 894,55 \text{ lbs}$$

$$\text{C en CaCO}_3 = 894,55 \times 0,12 = 107,4 \text{ lbs}$$

$$\text{C en coque} = 2100 \times 0,92 = 1932 \text{ lbs}$$

$$\text{C en arrabio} = 0,038 \times 2000 = 76 \text{ lbs.}$$

$$\text{C total en gas} = 1932 + 107,4 - 76 = 1963,4 \text{ lbs}$$

Asumimos 1 ft³ de gas y determinamos su contenido de C

$$C = (0,12 + 0,28) \times 12/359 = 0,01337 \text{ lbs./ft}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas} = 1963,4 / 0,01337 = 146846 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen del gas} = 146846 \text{ ft}^3/\text{ton. de arrabio (23-2)}$$

$$\text{P.C.B del coque} = 14600C + 61000(H - O/8) + 4000S - 1050(9H + W)$$

$$\text{P.C.B del coque} = 14600 \times 0,92 = 13432 \text{ BTU/lb}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas (CO)} = 341 \times 0,28 = 95,48 \text{ BTU/ft}^3$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 146846 \times 95,48 / 2100 \times 13432 = 0,497$$

$$\text{Poder calorífico del gas} = 49,7\% \text{ del de coque (23-3)}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas seco} = 146846 \times 0,6 = 88107,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{Soplo} = 88107,6 / 0,79 = 111529 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ ft}^3 = 0,02832 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 111529 \times 0,02832 = 3158,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Contenido de calor en el soplo a } 700^\circ\text{C:}$$

$$= 3158,5 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 701756 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 0,28 \times 3034 = 849,52 \text{ Kcal/m}^3$$

$$\text{Calor total del combustible suministrado a las estufas} = 701756 / 0,7 = 1'002'509 \text{ Kcal}$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 1'002'509 \text{ Kcal} / 849,52 \text{ (Kcal/m}^3\text{)} = 1180 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas seco} = 146846 \times 0,02832 = 4158,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 1180 / 4158,7 = 0,2837$$

$$\% \text{ de gas requerido por las estufas} = 28,37 \text{ (23-4)}$$

$$\text{Gas remanente} = 4158,7 - 1180 = 2978,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Potencia calorífica de este} = 2978,7 \times 0,28 \times 3034 = 2'530.465 \text{ Kcal}$$

Esta potencia se refiere a 1 tonelada de arrabio, pero en 1 día se producen 400 toneladas

$$\text{Potencia calorífica} = 2'530.465 \times 400 = 1012'186\,090 \text{ Kcal./dia.}$$

$$\text{Potencia calorífica} = 1012'186\,090/24 = 24'174.420 \text{ Kcal./hr}$$

$$1 \text{ H.P} = 641,8 \text{ Kcal./hr}$$

$$\text{Potencia generada} = 0,2 \times 24'174.420/641,8 = 13143 \text{ H.P}$$

$$\text{Potencia que puede generar el gas remanente a 20\% de conversión} = 13143 \text{ H.P (23-5)}$$

EJERCICIO N°24 (7)

Un alto horno produjo arrabio de la siguiente composición

C	3,9%
Mn	1,1
Si	2,1
Fe	92,9

El mineral tratado contenía

Fe ₂ O ₃	82%	MnO	4%
SiO ₂	8	Al ₂ O ₃	4
H ₂ O	2		

Se utilizó suficiente CaCO₃ para producir una escoria con 40% de CaO.

El coque contenía 88% C, 8% SiO₂, 1% Al₂O₃, 3% H₂O y se cargo en una cantidad de 950 kilogramos por tonelada de arrabio.

Los gases del horno contenían 29% CO, 13% CO₂ y 58% N₂ (análisis seco)

El soplo fue precalentado a 800°C en estufas con una eficiencia del 72%.

El gas no requerido por las estufas, fue utilizado para generar potencia en máquinas a una eficiencia del 25%.

PREGUNTAS

- 1 Los kilogramos de mineral tratado, por tonelada de arrabio producido, despreciando el hierro perdido en la escoria.
- 2 Los kilogramos de escoria producida, y los kilogramos de CaCO₃ requeridos
- 3 Los metros cúbicos del gas de alto horno (incluyendo el H₂O)
- 4 Los metros cúbicos del soplo (seco)
- 5 La proporción de gas requerido por las estufas
- 6 La potencia generada por el gas remanente, si el horno produce 1000 toneladas de arrabio por día

SOLUCION

1

$$\text{Peso de Fe en arrabio} = \text{Peso de Fe en mineral}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 929 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe en mineral} = 82 (112/160) = 57,4\%$$

$$\text{Mineral} = 929/0,574 = 1620 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del mineral} = 1620 \text{ Kg./ton. de arrabio (24-1)}$$

2

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$$

$$\text{MnO cargado} = 1620 \times 0,04 = 64,8 \text{ Kg}$$

$$\text{Mn en arrabio} = 1000 \times 0,011 = 11 \text{ Kg.}$$

$$\text{MnO reducido} = 11 (71/55) = 14,2 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO a escoria} = 64,8 - 14,2 = 50,6 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Si en arrabio} &= 1000 \times 0,021 = 21 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 21 (60/28) = 45 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \text{ cargado} &= 1620 \times 0,08 + 950 \times 0,08 = 205,6 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 \text{ a escoria} &= 205,6 - 45 = 160,6 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ cargado} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ a escoria} = 1620 \times 0,04 + 950 \times 0,01 = 74,3 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} 60\% \text{ escoria} &= \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \\ 60\% \text{ escoria} &= 50,6 + 160,6 + 74,3 = 285,5 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Escoria} = 285,5/0,6 = 475 \text{ Jg}$$

$$\text{Escoria producida} = 475 \text{ Kg./ton. de arrabio (24-2)}$$

$$\begin{aligned} \text{CaO} &= 475 - 285,5 = 189,5 \text{ Kg} \\ \text{CaCO}_3 &= 189,5 (100/56) = 339 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ requerido} = 339 \text{ Kg./ton. de arrabio (24-2)}$$

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

El cálculo del gas seco lo realizamos con la expresión (1)

$$\begin{aligned} \text{C en arrabio} &= 1000 \times 0,039 = 39 \text{ Kg} \\ \text{C en coque} &= 0,88 \times 950 = 836 \text{ Kg} \\ \text{C en CaCO}_3 &= 330 \times 0,12 = 40,68 \text{ Kg} \\ \text{C} \rightarrow \text{gas} &= 836 + 40,68 - 39 = 837,68 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Supongamos 1 m³ de gas seco y determinemos la cantidad de C que contiene

$$\text{C en gas} = (0,29 + 0,13) \times 12/22,4 = 0,225 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{Gas seco} = 837,68/0,225 = 3723 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O total} = (1620 \times 0,02 + 950 \times 0,03) \times 22,4/18 = 77 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas húmedo} = 3723 + 77 = 3800 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas húmedo} = 3800 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (24-3)}$$

$$\text{N}_2 \text{ del gas} = \text{N}_2 \text{ del aire}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas seco} = 3723 \times 0,58 = 2159,34 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 2159,34/0,79 = 2730 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo} = 2730 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (24-4)}$$

$$\begin{aligned} \text{Contenido de calor del soplo a } 800^\circ\text{C} &= 2730 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 800) \times 800 = 698006 \text{ Kcal} \\ \text{Esto corresponde al } 72\% \text{ de eficiencia de las estufas} \end{aligned}$$

$$\text{Calor total} = 698006/0,72 = 969450 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 0,29 \times 3034 = 880 \text{ Kcal./m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Gas requerido} = 969450 \text{ Kcal./} 880 \text{ (Kcal./m}^3 \text{ de gas)} = 1102 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas requerido por estufas} = 1102/3723 = 0,296$$

$$\text{Gas requerido por estufas} = 29,6\% \text{ (24-5)}$$

Para $\text{CaCO}_3 = 339 \text{ Kg./ton. de arrabio por día}$

$$\text{Gas en estufas} = 1'102.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas remanente} = 3'723.000 - 1'102.000 = 2'621.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Valor calorífico de este} = 2'621.000 \times 880 = 2306'480.000 \text{ Kcal./día}$$

$$\text{Valor calorífico de este} = 2306'480.000/24 = 96'000.000 \text{ Kcal/hr}$$

$$1 \text{ Kw-hr.} = 860 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia generada} = 0,25 \times 96 \times 10^6 / 860 = 27900 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia generada por gas remanente} = 27900 \text{ Kw. (24-6)}$$

EJERCICIO N°25 (7)

El volumen del gas producido en un alto horno fue de 4200 metros cúbicos, por 1000 kilogramos de arrabio, y su composición fue la siguiente:

CO	28,7%	H ₂	0,5%
CO ₂	10,3	N ₂	59,0
H ₂ O	1,5		

El horno produce 528 toneladas de arrabio por día con 4°C, utilizando 70 toneladas de piedra caliza (CaCO₃)

El coque utilizado contiene 85%C

El soplo es precalentado a 700°C en estufas que trabajan con una eficiencia térmica del 65%

El gas no utilizado en las estufas, es utilizado en máquinas a gas que operan a una eficiencia neta del 22%.

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de soplo utilizados, por tonelada de arrabio producido
2. Los kilogramos de coque utilizados, por tonelada de arrabio
3. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas.
4. La potencia calorífica del gas, por metro cúbico
5. El porcentaje del gas total que es utilizado en las estufas
6. La potencia generada por las máquinas a gas.

SOLUCION

$$1$$

$$N_2 \text{ en gas} = N_2 \text{ en soplo}$$

$$N_2 \text{ en gas} = 4200 \times 0,59 = 2478 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 2478 / 0,79 = 3136,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 3136,7 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (25-1)}$$

$$2$$

$$C \text{ en gas} = C \text{ en coque} + C \text{ en CaCO}_3 - C \text{ en arrabio.}$$

Para 1 tonelada de arrabio de arrabio

$$\text{CaCO}_3 = (70/528) \times 1000 = 132,6 \text{ Kg.}$$

$$C \text{ en esta} = 132,6 \times 0,12 = 15,9 \text{ Kg}$$

$$\text{CO} = 4200 \times 0,287 = 1205,4 \text{ m}^3$$

$$C_{\text{en este}} = 4200 \times 0,12 = 504 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{O}_2} = 4200 \times 0,103 = 432,6 \text{ m}$$

$$C_{\text{en este}} = 432,6 \times (12/22,4) = 231,75 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{en arrabio}} = 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{en coque}} = 231,75 + 646 - 15,9 = 901,85 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{coque}} = 901,85/0,85 = 1061 \text{ Kg}$$

$$\text{Coque} = 1061 \text{ Kg./ton. de arrabio. (25-2)}$$

Reacción en las toberas

$$C_{\text{O}_2} = CO$$

$$C_{\text{del soplo}} = 3140 \times 0,21 = 659,4 \text{ m}$$

$$659,4 \times 12/11,2 = 706,5 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{quemado en las toberas}} = 706,5/901,85 = 0,7834$$

$$C_{\text{del coque quemado en las toberas}} = 78,34\% \text{ (25-3)}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = CO + H_2$$

$$P.C.B \text{ del gas} = 3034 \times 0,287 + 2582 \times 0,005 = 884 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 884 \text{ Kcal/m}^3 \text{ (25-4)}$$

$$\text{Precalentamiento del aire a } 700^\circ\text{C} = 3140 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-4} \times 700 \times 700) = 697645 \text{ Kcal}$$

Este es el calor útil en las estufas que trabajaron con un 65% de eficiencia

$$\text{Calor total en estufas} = 697645/0,65 = 1'073.300 \text{ Kcal}$$

$$\text{Volumen de gas requiendo en las estufas} = 1'073.300 \text{ Kcal} / 884 \text{ (Kcal/m}^3) = 1214 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas requerido en estufas} = 1214/4200 = 0,289$$

$$\text{Gas requerido en estufas} = 28,9\% \text{ del total (25-5)}$$

$$\text{Gas remanente} = 4200 - 1214 = 2986 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio}$$

$$\text{Gas remanente total} = 2986 \times 528 = 1'576.608 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$C_{\text{contenido de calor de este}} = 1'576.608 \text{ m}^3/\text{dia} \times 884 \text{ Kcal/m}^3 = 1'393'721'472 \text{ Kcal/dia}$$

$$C_{\text{contenido de calor de este}} = 1'393'721'472/24 = 58'000'000 \text{ Kcal/hr}$$

$$1 \text{ Kilovatio-hora} = 860 \text{ Kilocalorias}$$

$$\text{Potencia generada} = 0,22 \times (58'000'000/860) = 14856 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia generada en máquinas a gas} = 14856 \text{ Kilovatios (25-6)}$$

EJERCICIO N°26 (7)

PREGUNTAS

Calcular la temperatura teórica en la zona de fusión de un alto horno, bajo tres condiciones hipotéticas, como sigue

$$1. F_{\text{soplo}} \text{ no es calentado (asumir } 0^\circ\text{C)}$$

$$2. F_{\text{soplo}} \text{ es calentado a } 700^\circ\text{C}$$

3. El soplo es de aire enriquecido, conteniendo 30%O₂, no calentado.

En cada caso, asumir que el coque es precalentado por los gases calientes ascendentes a la temperatura teórica de combustión, antes de quemarlo. Despreciar la humedad del soplo

SOLUCION

1

Supongamos cualquier cantidad de soplo, por ejemplo 100 m³

$$O_2 = 21 \text{ m}^3, N_2 = 79 \text{ m}^3$$

Reaccion en las toberas.



$$CO = 2 O_2 = 21 \times 2 = 42 \text{ m}^3$$

$$C = 42 \times 12 / 22.4 = 22.5 \text{ Kg}$$

Calor disponible = Potencia calorifica + calor por precalentamiento del C - calor en productos de combustion

$$\text{Potencia calorifica (C} \rightarrow \text{CO)} = 22.5 \times 2430 = 54675 \text{ Kcal}$$

$$\text{El calor específico del C (0 a 2000°C)} = 0.430$$

$$\text{Precalentamiento del C} = 22.5 \times 0.43 \cdot t = 9.675t$$

$$\text{Calor disponible} = 54675 + 9.675t$$

$$\text{Productos de combustion} = N_2 + CO = 79 + 42 = 121 \text{ m}^3$$

$$\text{Contenido de calor en productos de combustion} = 121 (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} t) + 36.542 t + 2.662 \times 10^{-3} t^2$$

Iguando:

$$54675 + 9.675t = 36.542 + 2.662 \times 10^{-3} t^2$$

Resolviendo para t

$$t = 1736^\circ\text{C}$$

Temperatura teórica en la zona de fusión = 1736°C (26-1)

2

$$\text{Calentamiento del soplo a 700°C} = 100 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 22218 \text{ Kcal}$$

$$\text{En las vecindades de 2000°C, el calor específico del C} = 0.20 + 0.00011 t$$

$$\text{Calentamiento del C} = 22.5 (0.20 + 0.00011 t) \cdot t = 4.5 t + 2.475 \times 10^{-3} t^2$$

$$\text{Calor disponible} = 54675 + 22218 + 4.5 t + 2.475 \times 10^{-3} t^2 = 36.542 t + 2.662 \times 10^{-3} t^2 + 1.87 \times 10^{-4} t^2 + 32.042 t - 76893 = 0$$

$$t = 2367^\circ\text{C}$$

Temperatura teórica en la zona de fusión = 2367°C (26.-2)

3

$$\text{En este caso: soplo} = 100 \text{ m}^3 (N_2 = 100 \times 0.7 = 70 \text{ m}^3; O_2 = 30 \text{ m}^3)$$

$$V_{\text{aire}} = 200 \times 0,79 = 158 \text{ m}^3$$

$$T_{\text{aire}} = 2/22,4 = 32,14 \text{ Kg}$$

$$\text{Productos de combustión} = \text{CO} + \text{N}_2 = 70 + 60 = 130 \text{ m}^3$$

$$\text{Potencia calorífica del C} = 32,14 \times 2430 = 78100,2 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precalentamiento del C} = 32,14 \times (0,20 + 0,00011 t) \cdot t = 6,428 t + 3,5354 \times 10^{-3} t^2$$

$$\text{Calor disponible} = 78100 + 6,428 t + 3,5354 \times 10^{-3} t^2$$

$$\text{Calor en productos de combustión} = 130 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} t) \cdot t = 39,26 t + 2,86 \times 10^{-1} t^2$$

$$\text{Igualando: } 6,754 \times 10^{-4} t^2 - 32,832 t + 78100 = 0$$

$$t = 2508^\circ \text{C}$$

$$\text{Temperatura teórica en la zona de fusión} = 2508^\circ \text{C} \text{ (26.3)}$$

EJERCICIO N°27 (7)

Un alto horno utiliza 3250 metros cúbicos de soplo por tonelada de arrabio producido. El soplo es precalentado a 600°C en estufas que trabajan con una eficiencia térmica del 60%. El horno produce 500 toneladas de arrabio por día.

El gas de alto horno que no es utilizado por las estufas, se utiliza para producir potencia, siendo la mitad quemado en calderas a una eficiencia térmica del 70% y la otra mitad utilizado directamente en máquinas a gas a una eficiencia del 25%. La composición del gas de alto horno es la siguiente:

CO	24,5%	H ₂ O	2,8%
CO ₂	13,4	N ₂	59,3

Asumir que el carbono del coque es precalentado a la temperatura de las toberas antes de ser quemado.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del gas total que es quemado en las estufas.
2. Los caballos-caldera de potencia desarrollados en la caldera.
3. Los caballos de fuerza desarrollados en las máquinas a gas.
4. La máxima temperatura teórica en las toberas.

SOLUCION

1. El volumen del gas utilizado en las estufas, se deduce a partir del calor utilizado en ellas para calentar el aire a una temperatura determinada, que en este caso es de 600°C .

$$N_2 \text{ en aire} = N_2 \text{ en gas}$$

$$N_2 = 3250 \times 0,79 = 2567,5 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio}$$

$$N_2 \text{ total} = 2567,5 \times 500 = 1'283.750 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas total} = 1'283.750 / 0,593 = 2'164.839 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 3250 \times 500 = 1'625.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Contenido de calor del aire en estufas a } 600^\circ \text{C} = 1'625.000 (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} \times 600) \times 600 = 17'320.000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor total en estufas} = 307'320\,000/0,6 = 512'200\,000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 3034 \times 0,245 = 743 \text{ Kcal./m}^3$$

$$\text{Gas requerido por estufas} = 512\,200.000 \text{ Kcal} / 743 \text{ Kcal./m}^3 \text{ de gas} = 689\,368 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas requerido por estufas} = 689\,368/2'164.839 = 0,319$$

$$\text{Gas requerido por estufas} = 31,9\% \text{ del total (27-1)}$$

2

$$\text{Gas remanente} = 2'164.839 - 689.368 = 1'475\,471 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$\text{Gas quemado en calderas} = 1'475.471 \times 0,5 = 737.736 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia calorífica de este gas} &= 737.736 \text{ m}^3 \times 734 \text{ Kcal./m}^3 = 548'137\,105 \text{ Kcal./dia} \\ 548'137.105/1440 &= 380650 \text{ Kcal./min} \end{aligned}$$

$$1 \text{ caballo} - \text{caldera} = 140,7 \text{ Kcal./min}$$

$$\text{Caballos} - \text{caldera desarrollados} = 0,7 \times (380650/140,7) = 1890$$

$$\text{Potencia desarrollada en la caldera} = 1890 \text{ caballo} - \text{caldera. (27-2)}$$

3

$$\begin{aligned} \text{Potencia calorífica del gas en las máquinas a gas} &= 548\,137\,105 \text{ Kcal./dia} = 548'137\,105/24 \\ &= 2,29 \times 10^7 \text{ Kcal./hr} \end{aligned}$$

$$1 \text{ H.P.} = 640 \text{ Kcal./hr}$$

$$\text{Potencia desarrollada en máquinas a gas} = 0,25 \times 2,29 \times 10^7/640 = 8920 \text{ H.P.}$$

$$\text{Potencia desarrollada en máquinas a gas} = 8920 \text{ H.P. (27-3)}$$

4

Reacción en las toberas.



$$\text{O}_2 = 1'625\,000 \times 0,21 = 341\,250 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} = 2 \text{ O}_2 = 682\,500 \text{ m}^3$$

$$\text{C} = 682\,500 \times 12/22,4 = 365\,625 \text{ Kg}$$

$$\text{Productos de combustión} = \text{CO} + \text{N}_2 = 682\,500 + 1'625\,000 \times 0,79 = 1'966\,250 \text{ m}^3$$

El calor en los productos de combustión = potencia calorífica del C + precalentamiento del aire + precalentamiento del C

$$\text{Precalentamiento del aire} = 1'625\,000 \times (0,102 + 2,2 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 307'320\,000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica de C} \rightarrow \text{CO} = 365\,625 \times 2430 = 888'468.750 \text{ kcal}$$

$$\text{En la vecindad de los } 2000^\circ\text{C, el calor específico del C} = 0,20 + 0,00011 \text{ t}$$

En el proceso de alto horno para efectos de calculos, normalmente se asume para el coque que la temperatura incógnita $t = t - 300^\circ\text{C}$ (7, pag. 104)

$$\begin{aligned} \text{Precalentamiento del C} &= 365\,625 \times [0,20 + 0,00011(t - 300)] \times (t - 300) \\ &= 48993,75 t + 40,2 t^2 - 18'317,8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor disponible} &= 307'320.000 + 888'468.750 + 48993,75 t + 40,2 t^2 - 18'317,8 \\ &= 1177'470\,938 + 48993,75 t + 40,2 t^2 \end{aligned}$$

$$\text{Calor en productos de combustión (CO + N}_2\text{)} = 1'966.250 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3}) \cdot t$$

igualando

$$1177'470'938 + 48993'75 t + 40,2 t^2 = 593807,7 t + 43,2575 t^2$$

Resolviendo para t, encontramos que $t = 2135,3^\circ\text{C}$

Temperatura máxima teórica en las toberas = $2135,3^\circ\text{C}$ (27-4)

EJERCICIO N°28 (7)

Un alto horno utiliza un soplo precalentado a 600°C . El época húmeda el aire contiene 5% de vapor de agua. Esta es descompuesta al entrar al horno de acuerdo a la siguiente reacción



Asumir que el carbono que se quema en la zona de toberas se encuentra a la temperatura máxima de los gases

PREGUNTAS

1. La temperatura teórica máxima de los gases en la zona de toberas, cuando el soplo está seco
2. Lo mismo, cuando el soplo contiene 5% de humedad
3. La relación de cambio en la energía de fusión en los dos casos.

SOLUCION

1.
Calor disponible = Potencia calorífica + precalentamiento del aire + precalentamiento de coque
Calor en productos de combustión

Asumo 100 m^3 de aire seco ($\text{N}_2 = 79 \text{ m}^3$, $\text{O}_2 = 21 \text{ m}^3$)

Reacción en toberas: $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$; $\text{CO} = 2 \times 0,21 = 42 \text{ m}^3$; $\text{C} = 42 \times 12/22,4 = 22,5 \text{ Kg}$.

Productos de combustión = $\text{CO} + \text{N}_2 = 79 + 42 = 121 \text{ m}^3$

Precalentamiento del aire = $100 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} \times 600) \times 600 = 18912 \text{ Kcal}$

Potencia calorífica del $\text{C} \rightarrow \text{CO} = 22,5 \times 2430 = 54675 \text{ Kcal}$

El calor específico del C (0°C a 2500°C) = $0,206 + 1,78 \times 10^{-4} t - 3,3 \times 10^{-8} t^2$, para $t = 2500^\circ\text{C}$ el calor específico será = $0,44475 \text{ Kcal/Kg.grado}$.

Calor disponible = $18912 + 54675 + 22,5 \times 0,44475 t = 73587 + 10,007 t$

Calor en productos de combustión ($\text{CO} + \text{N}_2$) = $121 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} t) \cdot t = 36,542 t + 2,662 \times 10^{-3} t^2$

Igualando

$$73587 + 10,007 t = 36,542 t + 2,662 \times 10^{-3} t^2$$

$t = 2260^\circ\text{C}$

Temperatura máxima teórica de los gases (aire seco) = 2260°C (28-1)

Si el aire contiene 5% de humedad

Asumimos 100 m³ de aire húmedo

$$H_2O = 5 \text{ m}^3; N_2 = 95 \times 0,79 = 75,05 \text{ m}^3; O_2 = 95 \times 0,21 = 19,95 \text{ m}^3$$

Reaccion de descomposición del agua



$$CO = 5 \text{ m}^3; H_2 = 5 \text{ m}^3; C = 5 \cdot (12/22,4) = 2,679 \text{ Kg}$$

Reacción en toberas



$$O_2 = 19,95 \text{ m}^3; CO = 2 \times 19,95 = 39,9 \text{ m}^3; X = 39,9 \times 12/22,4 = 21,375 \text{ Kg}$$

$$C \text{ total} = 21,375 + 2,679 = 24,054 \text{ Kg}$$

$$CO \text{ total} = 5 + 39,9 = 44,9 \text{ m}^3$$

$$CO + N_2 = 44,9 + 75,05 = 119,95 \text{ m}^3$$

$$\text{Precalentamiento del aire seco} = 95 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 17966,4 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precalentamiento del agua} = 5 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 1209 \text{ Kcal}$$

El calor específico del C en las vecindades de 2000°C $= 0,206 + 1,78 \times 10^{-4} t - 3,3 \times 10^{-8} t^2$, cuando t se convierte en una incógnita, el término t^2 de este calor específico genera una ecuación cubica, para evitar lo cual se acostumbra a darle a una de las t's el valor de 2000 convirtiendo así el calor específico en $0,206 + 0,00011 t$. (7, pag. 105)

$$\begin{aligned} \text{Precalentamiento del C} &= 24,054 \times (0,206 + 1,78 \times 10^{-4} t - 3,3 \times 10^{-8} \times 2000 t) \cdot t = \\ &= 4,9551 t + 2,694 \times 10^{-3} t^2 \end{aligned}$$

$$\text{Potencia calorífica del C} \rightarrow CO = 24,054 \times 2430 = 58451 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor disponible} &= 17966 + 1209 + 58451 + 4,9551 t + 2,694 \times 10^{-3} t^2 \\ &= 77626 + 4,9551 t + 2,694 \times 10^{-3} t^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A este calor hay que restarle el utilizado en descomponer el agua} &= 3210 \text{ Kcal/Kg} \\ H_2O &= 5 \times 18/22,4 = 4,02 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Calor de descomposición del agua} = 4,02 \times 3210 = 12904,2 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor disponible} &= 77626 + 4,9551 t + 2,694 \times 10^{-3} t^2 - 12904 \\ &= 64722 + 4,9551 t + 2,694 \times 10^{-3} t^2 \end{aligned}$$

Contenido de calor en productos de combustión

$$\begin{aligned} CO + N_2 &= 119,95 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t \\ H_2 &= 5 \times (0,301 + 2 \times 10^{-5} t) \cdot t \\ \Sigma &= 37,7299 t + 2,7389 \times 10^{-3} t^2 \end{aligned}$$

igualando

$$64722 + 4,9551 t + 2,694 \times 10^{-3} t^2 = 37,7299 t + 2,7389 \times 10^{-3} t^2$$

$$t = 1970^\circ\text{C}$$

Temperatura máxima teórica con el aire húmedo = 1970°C (28-2)

Se de acuerdo a la definición de Johnson, se toman 1500°C como la temperatura crítica a la cual hay fácil fluencia de la escoria (7), el cambio en el poder de fusión viene dado por $1 - 1500$, siendo 1 la temperatura correspondiente al contenido de calor de los gases productos de la combustión. La relación de cambio que se solicita, será:

$$1 = \frac{1970 - 1500}{2260 - 1500} = 0,381 = 38,1\%$$

Relación de cambio en el poder de fusión = 38,1% (28-3)

EJERCICIO N°29 (7)

Un alto horno para hierro utiliza un soplo, el cual a la entrada a las estufas tiene una presión de 1,6 atmósferas (manómetro) y una temperatura de 45°C , y está saturado con vapor de agua. Las estufas lo calientan a 700°C .

Se asume que el carbono del coque, justo antes de ser consumido por el soplo, ha alcanzado una temperatura 300°C menor que la temperatura de los gases productos de la combustión.

PREGUNTAS

- 1 La temperatura teórica máxima en la zona de fusión del horno.
- 2 La temperatura si el soplo fuera secado completamente.
- 3 La temperatura si el soplo no fuera ni secado ni precalentado, entrando al horno a 0°C .

SOLUCION

1
Calor disponible = Potencia calorífica del combustible + Contenido de calor por precalentamientos = Contenido de calor en los productos de combustión

Partamos de 100 m^3 de aire seco.

A 45°C la presión de saturación con agua = 71,9 mm

Presión de aire húmedo = $1,6 \times 760 = 1216 \text{ mm}$

Presión de aire seco = $1216 - 71,9 = 1144,1 \text{ mm}$

Volumen de $\text{H}_2\text{O} = 100 \times 71,9 / 1144,1 = 6,284 \text{ m}^3 = 5,05 \text{ Kg}$.

Aire húmedo = $100 + 6,286 = 106,284 \text{ m}^3$ $\text{O}_2 = 21 \text{ m}^3$, $\text{N}_2 = 79 \text{ m}^3$, $\text{H}_2\text{O} = 6,284 \text{ m}^3$

Reacciones.

En toberas: $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$

$\text{CO} = 2 \text{ O}_2 = 42 \text{ m}^3$, $\text{C} = 42 \times 12 / 22,4 = 22,5 \text{ Kg}$

Descomposición del agua: $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{CO} + \text{H}_2$

$\text{CO} = 6,284 \text{ m}^3$, $\text{H}_2 = 6,284 \text{ m}^3$, $\text{C} = 6,284 \times 12 / 22,4 = 3,366 \text{ Kg}$.

C total = $22,5 + 3,366 = 25,866 \text{ Kg}$.

Productos de combustión:

$\text{CO total} + \text{N}_2 = 42 + 6,284 + 79 = 127,284 \text{ m}^3$

$\text{H}_2 = 6,284 \text{ m}^3$

Contenido de calor por precalentamientos

$$\text{Aire seco} = 100 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 22218 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 6,284 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 1795 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del C} \rightarrow \text{CO} = 25,866 \times 2430 = 62854,4 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precalentamiento del C} = 25,866 \times [0,206 + 0,000112 (t - 300)] (t - 300) \\ = 3,5962 t + 2,8967 \times 10^{-3} t^2 - 1337,5$$

$$\text{Calor de descomposición del H}_2\text{O} = 5,05 \times 3210 = 16210,5 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor disponible} = 22218 + 1795 + 62854,4 - 16210,5 - 1337,5 + 3,5962 t + 2,8967 \times 10^{-3} t^2 \\ = 69319,4 + 3,5962 t + 2,8967 \times 10^{-3} t^2$$

Contenido de calor en productos de combustión a cualquier temperatura

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 127,284 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) t = 384398 t + 2,8 \times 10^{-3} t^2$$

$$\text{H}_2 = 6,284 \times (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} t) t = 1,8915 t + 1,2568 \times 10^{-4} t^2$$

$$\text{Total calor en productos de combustión} = 40,3313 t + 2,926 \times 10^{-3} t^2$$

Iguando el calor disponible con el calor en los P.C. y despejando "t"

$$2,93 \times 10^{-3} t^2 + 36,7351 t - 69319,4 = 0 \\ t = 1884^\circ\text{C}$$

Temperatura máxima en zona de fusión = 1884°C (29-1)

2

Si el soplo es secado completamente:

$$\text{Soplo} = 100 \text{ m}^3; \text{O}_2 = 21 \text{ m}^3; \text{N}_2 = 79 \text{ m}^3$$

$$\text{Reacción en toberas: C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO} \\ \text{CO} = 42 \text{ m}^3; \text{C} = 22,5 \text{ Kg.}$$

$$\text{Productos de combustión: CO} + \text{N}_2 = 42 + 79 = 121 \text{ m}^3$$

$$\text{Precalentamiento del soplo} = 22218 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Potencia calorífica del C} \rightarrow \text{CO} = 22,5 \times 2430 = 54675 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precalentamiento del C} = (3,5962 t + 2,8967 \times 10^{-3} t^2 - 1337,5) \times 22,5 / 25,866 \\ = 3,1282 t + 2,52 \times 10^{-3} t^2 - 1163,4$$

$$\text{Sumando los términos anteriores, encontramos el calor disponible} \\ = 75730 + 3,1282 t + 2,52 \times 10^{-3} t^2$$

Calor en productos de combustión

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 121 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 36,542 t + 2,662 \times 10^{-3} t^2$$

Iguando el calor disponible y los productos de combustión y luego despejando y ordenando obtendremos

$$1,42 \times 10^{-3} t^2 + 33,4138 t - 75730 = 0$$

$$t = 2245^\circ\text{C}$$

Temperatura máxima en la zona de fusión cuando el soplo está seco = 2245°C (29-2)

3.

$$\text{A } 0^\circ\text{C, la presión de saturación del agua} = 4,9 \text{ mm}$$

$$\text{Presión de aire seco} = 1216 - 4,9 = 1211,1 \text{ mm}$$

$$\text{Volumen de H}_2\text{O} = 100 \times 4,9 / 1211,1 = 0,405 \text{ m}^3$$

$$3.2 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot \text{CO} \cdot \text{H} \\ = 12.4 \cdot 0.217 \text{ Kg}$$

$$\text{C total} = 22.5 + 0.217 = 22.717 \text{ Kg}$$

$$\text{CO total} + \text{N}_2 = 79 + 0.405 + 42 = 121.405 \text{ m}^3$$

$$\text{Potencia calorífica del C} \rightarrow \text{CO} = 22.717 \times 2430 = 55202.31 \text{ Kg}$$

$$\text{Calor de descomposición del H}_2\text{O} = 0.405 \times (18.22.4) \times 3210 = 1044.7 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precaentamiento del C} = (3.5962 \text{ t} + 2.8967 \times 10^{-3} \text{ t}^2 - 1337.5) \times 22.717 = 25.866 \\ = 3.1584 \text{ t} + 2.544 \times 10^{-3} \text{ t}^2 - 1174.7$$

Contenido de calor en los productos de combustión

$$\text{N}_2 + \text{CO} = 121.405 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-3} \text{ t}) \cdot \text{t} =$$

$$\text{H}_2 = 0.405 \times (0.301 + 2.0 \times 10^{-3} \text{ t}) \cdot \text{t} = \\ \Sigma = 36.7862 \text{ t} + 2.679 \times 10^{-3} \text{ t}^2$$

Sumando el calor aportado, al cual se le ha restado el calor de descomposición del agua, e igualando con el contenido de calor en los productos de combustión, cancelando términos y despejando, obtendremos

$$1.35 \times 10^{-4} \text{ t}^2 + 33.6278 \text{ t} - 52983 = 0$$

$$\text{t} = 1566^\circ\text{C}$$

Temperatura máxima en la zona de fusión = 1566°C (29.3)

EJERCICIO N°30 (7)

Los siguientes datos fueron tomados de un alto horno que produce 600 toneladas de arrabio diariamente

MINERAL (%)		COQUE (%)		FUNDENTE (%)		GAS HECHO (%)		ARRABIO HECHO (%)	
Fe ₂ O ₃	90	C	86	SiO ₂	5	CO	24	Si	1.4
SiO ₂	5	SiO ₂	6	CaCO ₃	75	CO ₂	12	C	3.6
Al ₂ O ₃	3	Al ₂ O ₃	5	MgCO ₃	20	H ₂	2	Fe	95.0
CaO	1	CaO	1			CH ₄	2		
H ₂ O	1	MgO	1			N ₂	60		
		H	1						

La escoria producida contiene 45% CaO - MgO. Se utilizaron 0.9 toneladas de coque por tonelada de arrabio producido. Después del suministrado a las estufas, el gas remanente se utilizó en máquinas a gas con una eficiencia termomecánica de 25% y generó 17340 Kw. La temperatura del soplo fue de 700°C y su presión de 1.3 atmósferas (barómetro).

Asumir que el calor específico del coque es el mismo que el del carbono puro. Asumir que el H₂ libre y el H del CH₄ provienen del H del coque y de la descomposición del H₂O del soplo por carbono.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, por tonelada de arrabio
2. El peso del fundente utilizado por tonelada de arrabio
3. El peso de la escoria producida, por tonelada de arrabio.
4. El volumen del gas producido (seco), por tonelada de arrabio
5. El volumen del soplo utilizado (incluyendo la humedad), por tonelada de arrabio
6. La eficiencia térmica de las estufas
7. La presión parcial del vapor de agua en el soplo, y el número de galones de agua que entran al horno por minuto en el soplo

- 8 El porcentaje del calor generado por la combustión de, carbono en las toberas, que es absorbido por la descomposición del H_2O
- 9 El ahorro en toneladas de coque diariamente, por remoción de, 70% de este vapor de H_2O
- 10 La disminución de la temperatura en las toberas, producida por el vapor de agua

SOLUCION

1

Peso de Fe en mineral = Peso de Fe en arrabio

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,95 = 950 \text{ kg}$$

$$\text{Fe en Mineral} = 90 \times 112,160 = 63\%$$

$$\text{Mineral} = 950/0,63 = 1510 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del mineral} = 1510 \text{ Kg./ ton de arrabio (30-1)}$$

2

El peso del fundente debe calcularse en forma simultanea con el de la escoria, utilizando para ello el *método algebraico*

Sea: X = peso de la escoria; Y = peso del fundente

$$\text{Escoria} = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$$

$$\text{CaO en mineral} = 1510 \times 0,01 = 15,1 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO en coque} = 900 \times 0,01 = 9 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO en fundente} = 0,75Y \times (56/100) = 0,42Y$$

$$\text{CaO a escoria} = 15,1 + 9,0 + 0,42Y = 24,1 + 0,42Y$$

$$\text{MgO en coque} = 900 \times 0,01 = 9 \text{ Kg}$$

$$\text{MgO en fundente} = 0,2Y \times (40,84) = 0,0951Y$$

$$\text{MgO a escoria} = 9 + 0,0951Y$$

Como $\text{CaO} + \text{MgO} = 45\%$ de la escoria, formularemos la siguiente ecuación

$$0,45X = 24,1 + 0,42Y + 9 + 0,0951Y = 33,1 + 0,5151Y$$

$$(1) \quad 0,45X = 33,1 + 0,5151Y$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en mineral} = 1510 \times 0,05 = 75,5 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en coque} = 900 \times 0,06 = 54 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en fundente} = 0,05Y$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 1000 \times 0,014 \times 60/28 = 30 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 75,5 + 54 + 0,05Y - 30 = 99,5 + 0,05Y$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ a escoria} = 1510 \times 0,03 + 900 \times 0,05 = 90,3 \text{ Kg}$$

$$0,55X = 99,5 + 90,3 + 0,05Y = 189,8 + 0,05Y$$

$$(2) \quad 0,55X = 189,8 + 0,05Y$$

Disponemos del siguiente sistema de ecuaciones

$$(1) \quad 0,45X = 33,1 + 0,5151Y$$

$$(2) \quad 0,55X = 189,8 + 0,05Y$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, tendremos

$$Y = \text{fundente} = 257 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del fundente} = 257 \text{ Kg./ton de arrabio}$$

Del sistema de ecuaciones anterior

$$X_{\text{escoria}} = 1189,9 + 0,05 \times 257 \times 0,55 = 368,63 \text{ Kg.}$$

Peso de la escoria = 368,63 Kg./ton. de arrabio (30-3)

Aplicaremos la expresión (1)

$$C \text{ en coque} = 900 \times 0,86 = 774 \text{ Kg}$$

$$C \text{ en } CaCO_3 = 257 \times 0,75 \times 0,12 = 23,13 \text{ Kg}$$

$$C \text{ en } MgCO_3 = 257 \times 0,2 \times 0,284 = 7,35 \text{ Kg}$$

$$C \text{ en arrabio} = 1000 \times 0,036 = 36 \text{ Kg}$$

$$C \text{ total en gas} = 774 + 23,13 + 7,35 + 36 = 768,48$$

Veamos la cantidad de C que contiene 1 m³

$$C = 0,204 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas}$$

$$C \text{ en gas} = (0,24 + 0,12 + 0,02) \times$$

$$C \text{ en gas} = 768,48 / 0,204 = 3770$$

$$\text{Volumen de gas} = 3770 \text{ m}^3 / \text{ton. de arrabio (30-4)}$$

$$N_2 \text{ en } N_2 = 2262 / 0,79 = 2864 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ en } N_2 = 2262 / 0,79 = 2864 \text{ m}^3$$

A.

nos que parte del H₂ en el gas, proviene de la descomposición de la humedad.

$$H_2 \text{ libre} = 3770 \times 0,02 = 75,4 \text{ m}^3$$

$$H_2 \text{ del } CH_4 = 3770 \times 0,02 \times 2 = 150,8 \text{ m}^3$$

$$H_2 \text{ en coque} = 9 \times 22,4 / 2 = 100,8 \text{ m}^3$$

$$H_2 \text{ de descomposición del } H_2O = 75,4 + 150,8 - 100,8 = 125,4 \text{ m}^3$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O: H_2 = H_2O = 125,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo húmedo} = 2864 + 125,4 = 2990 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo húmedo} = 2990 \text{ m}^3 (30.5)$$

Para este cálculo, procedemos así

Precalentamientos en estufas a 700°C de

$$\text{Aire seco} = 2864 \times 600 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 381'794.112 \text{ Kcal}$$

$$\text{Humedad} = 125,4 \times 600 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 21'488.544 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor por precalentamientos} = 403'282.656 \text{ Kcal./dia}$$

Potencia calorífica del gas = CO + H₂ + CH₄

$$P.C.B \text{ del gas} = 0,24 \times 3034 + 0,02 \times 2582 + 0,02 \times 8560 = 951 \text{ Kcal./m}^3 \text{ de gas}$$

Vamos a encontrar la cantidad de gas y por tanto el calor que salió de las estufas y entró a las máquinas a gas donde se operó con 25% de eficiencia térmica

$$\text{Si } \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}} = \frac{\text{Kw}}{\text{calor}}$$

$$\text{Calor contenido en el gas} = 860 \times 17340 = 14'912.400 \text{ Kcal. / hr}$$

$$\text{Calor contenido en el gas} = 14'912.400 / 0,25 = 59'649.600 \text{ Kcal./hr}$$

$$\text{Calor contenido en el gas} = 59'649.600 \text{ Kcal. / dia}$$

El gas que entró a las máquinas = $1431'590.400 / 951 = 1'505.353 \text{ m}^3 / \text{día}$

Gas total producido = $3770 \times 600 = 2'262.000 \text{ m}^3 / \text{día}$

Gas requerido por las estufas = $2'262.000 - 1'505.353 = 756.647 \text{ m}^3 / \text{día}$

Calor de este gas = $756647 \times 951 = 719'571.297 \text{ Kcal} / \text{día}$

Eficiencia térmica de las estufas = $403'282.656 / 719'571.297 = 0,56 = 56\%$

Eficiencia térmica de las estufas = 56% (30-6)

7

Presión del soplo $1,3 \times 760 = 988 \text{ mm}$

Volumen de aire seco = 2864 m^3

Volumen de H_2O = $125,4 \text{ m}^3$

$$2864 \times \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{988 - P_{\text{H}_2\text{O}}} = 125,4$$

$P_{\text{H}_2\text{O}} = 41,4 \text{ mm}$

Presión parcial del vapor de agua en el soplo = 41,4 mm (30-7)

1 galón británico = 4,5996 litros

Volumen de agua = $125,4 \times 600 = 75240 \text{ m}^3 / \text{día}$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 75240 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1000 \text{ lts}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ galón}}{4,5996 \text{ lts}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 11360$$

Volumen de agua = 11360 galones / min. (30-7)

8

En las toberas: $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$

O_2 del soplo = $2864 \times 600 \times 0,21 = 360864 \text{ m}^3$

C de este = $360864 \times 12 / 22,4 = 386640 \text{ Kg}$

Calor de combustión $\text{C} \rightarrow \text{CO} = 2430 \times 386640 = 936'535.200 \text{ Kcal}$

Calor de descomposición del agua = $3210 \times 125,4 \times 600 \times 18 / 22,4 = 194'078.893 \text{ Kca.}$

Calor de descomposición = $194'078.893 / 936'535.200 = 0,207$

Calor de descomposición = 20,7% (30-8)

$$m_{\text{agua}} = 125,4 \times 600 \times 0,7 \times (18/22,4) = 42322,5 \text{ Kg}$$

$$Q_{\text{calor necesario para descomponer esta}} = 42322,5 \times 3210 = 135'855.225 \text{ Kcal}$$

$$C_{\text{ahorrado}} = 135'855.225 / 2430 \times 1000 = 55,91 \text{ ton}$$

$$C_{\text{ahorrado}} = 55,91 \text{ ton (30-9)}$$

$$\text{Coque ahorrado} = 55,91/0,86 = 65,0 \text{ ton}$$

$$\text{Coque ahorrado} = 65,0 \text{ ton. (30-9)}$$

.0

Debemos calcular la temperatura en las toberas con y sin vapor de agua en el soplo, para luego establecer la diferencia

Calor disponible = calor en productos de combustion

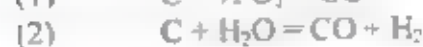
Con vapor de agua

Calor disponible - precalentamiento del agua - precalentamiento del aire seco = potencia calorífica del C - calor de descomposición del agua

$$\text{Precalentamiento del aire seco} = 381'794.112 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precalentamiento del agua} = 21'488.544 \text{ Kcal}$$

Reacciones



$$O_2 = 2864 \times 0,21 \times 600 = 360864 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 2864 \times 0,79 \times 600 = 1'375.536 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 125,4 \times 600 = 75240 \text{ m}^3$$

$$\text{Reacción (1): } CO = 2 O_2 = 721728 \text{ m}^3; C = 360864 \times 12/11,2 = 386640 \text{ Kg}$$

$$\text{Reacción (2): } CO = H_2 = 75240 \text{ m}^3; C = 75240 \times 12/22,4 = 40307 \text{ Kg}$$

$$CO_{\text{total}} = 721728 + 75240 = 796968 \text{ m}^3$$

$$C_{\text{total}} = 386640 + 40307 = 426947 \text{ Kg}$$

$$\text{Precalentamiento del C} = 426947 \times (0,206 + 0,000112 t) \cdot t = 87951 t + 47,82 t^2$$

$$\text{Potencia calorífica del C} \rightarrow CO = 426947 \times 2430 = 1037'481.210 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor de descomposición del } H_2O = 135'855.255 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor disponible} = 381'794.112 + 21'488.544 - 1037'481.210 - 87951 t + 47,82 t^2$$

$$135'855.255 = 1304'908.641 + 87951 t + 47,82 t^2$$

Contenido de calor en los productos de combustion

$$N_2 + CO = (1'375.536 + 796.968) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} t) \cdot t$$

$$H_2 = 75240 \times (0,301 + 2 \times 10^{-3} t) \cdot t$$

$$\Sigma = 678743 t + 49,30 t^2$$

Iguando el calor disponible con el calor en los productos de combustion y despejando.

$$48 t^2 - 90'752 t - 1304'908.641 = 0$$

$$2 \cdot 48$$

Se despeja de aquí

Calor disponible = precalentamiento del aire (seco) + precalentamiento del C + potencia calorífica del C

$$\text{Precalentamiento del C} = 386640 \times (0,206 + (-0,00112 t)) \cdot t = 79648 t + 43,30 t^2$$

$$\text{Potencia calorífica del C} = 386640 \times 2430 = 939'535.200 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor disponible} &= 381'794.112 + 939'535.200 + 79648 t + 40,30 t^2 \\ &= 1321'329.312 + 79648 t + 40,30 t^2 \end{aligned}$$

Calor en productos de combustión

$$\text{N}_2 + \text{CO} = (1'375.536 + 721728) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = 633374 t + 46,14 t^2$$

Igualando (calor disponible = calor en productos de combustión) y despejando

$$\begin{aligned} 2,84 t + 552726 t - 1321'329.312 &= 0 \\ t &= 2358^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{Disminución de temperatura} = 2358 - 2197 = 161^\circ\text{C}$$

En vapor de agua disminuyó la temperatura en 161°C (30-10)

EJERCICIO N°31 (7)

Un alto horno funciona bajo 2 condiciones atmosféricas:

- Soplo seco, presión barométrica de 760 mm, temperatura de 600°C
- Soplo húmedo, presión barométrica de 700 mm, temperatura de 600°C saturado con humedad a 25°C , antes de calentarlo

Las máquinas operan a velocidad constante o desplazamiento constante de pistón

La temperatura crítica necesitada en la zona de fusión se asume como de 1500°C

Asumir que el carbono quemado en la zona de fusión está precalentado a esta temperatura

PREGUNTAS

- La temperatura teórica máxima de los gases en la zona de fusión en el caso (a).
- Lo mismo, para el caso (b.)
- El peso relativo del carbono quemado por día en la zona de toberas por el soplo en los dos casos
- Si, en el caso (a) se necesitan 800 kilogramos de carbono ante las toberas por tonelada de arrabio, ¿cuántos serían requeridos en el caso (b.)?

SOLUCION

1
Reacción



Asumimos 1 Kg. de C.

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 1 \times 0,5 \times 22,4 / 12 = 0,9333 \text{ m}^3; \text{CO} = 2 \text{ O}_2 = 1,8666 \text{ m}^3 \\ \text{Aire} &= 0,9333 / 0,21 = 4,4443 \text{ m}^3; \text{N}_2 = 0,9333 \times 79 / 21 = 3,5110 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Calor disponible = Precalentamiento del aire + Precalentamiento del C + Potencia calorífica
Calor en productos de combustión

$$\text{Precaentamiento de aire a } 600^{\circ}\text{C} = 4,4443 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 840,51$$

$$\text{Precaentamiento de C} = (0,206 + 1,78 \times 10^{-4} \times 1500 + 3,3 \times 10^{-8} \times 1500^2) \times 1500 = 598,13$$

Potencia calorífica del C = 1 x 2430

$$= 2430,00 \text{ Kcal}$$

Calor disponible

$$= 3868,64 \text{ kcal}$$

Calor en los productos de combustión

$$\text{CO} + \text{N}_2 = (3,511 + 1,8666) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \times t = 1,6241 + 1,183 \times 10^{-4} t^2$$

$$3868,64 = 1,624 t + 1,183 \times 10^{-4} t^2$$

$$t = 2070^{\circ}\text{C}$$

Temperatura máxima de los gases en la zona de fusión = 2070°C (31-1)

Presión de saturación del agua a $25^{\circ}\text{C} = 23,8 \text{ mm}$

$$\text{Presión de aire seco} = 700 - 23,8 = 676,2 \text{ mm}$$

$$\text{Volumen de agua} = 4,4443 \times 23,8 / 676,2 = 0,1564 \text{ m}^3$$

En las toberas



$$\text{CO} = \text{H}_2 = 0,1564 \text{ m}^3$$

$$\text{CO total} = 0,1564 + 1,8666 = 2,023 \text{ m}^3$$

$$\text{C} = 0,1564 \times 12 / 22,4 = 0,0838 \text{ Kg}$$

$$\text{C total} = 0,0838 + 1 = 1,0838 \text{ Kg}$$

Calor disponible = precaentamiento de aire seco + precaentamiento de humedad + precaentamiento del C - potencia calorífica - calor de descomposición del agua = calor en productos de combustión

$$\text{Precaentamiento del aire seco} = 840,51 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precaentamiento del agua} = 0,1564 \times (0,373 + 5 \times 10^{-4} \times 600) \times 600 = 37,82 \text{ Kcal}$$

$$\text{Precaentamiento de C} = 0,0838 \times (0,206 + 1,78 \times 10^{-4} \times 1500 + 3,3 \times 10^{-8} \times 1500^2) \times 1500 = 648,25$$

$$\text{Potencia calorífica del C} = 1,0838 \times 2430 = 2633,63$$

$$\text{Calor de descomposición del agua} = 0,1564 \times 3210 \times 18 / 22,4 = 403,43$$

$$\text{Calor disponible} = 840,51 + 37,83 + 648,25 + 2633,63 - 403,43 = 3756,78 \text{ Kcal}$$

Calor en productos de combustión

$$\text{CO} + \text{N}_2 = (1,8666 + 3,511) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \times t =$$

$$\text{H}_2 = 0,1564 \times (0,301 + 2 \times 10^{-5} t) \times t =$$

$$\text{Calor en productos de combustión} = 1,6711 t + 1,214 \times 10^{-4} t^2$$

$$3756,78 = 1,6711 t + 1,214 \times 10^{-4} t^2$$

$$t = 1967^{\circ}\text{C}$$

Temperatura teórica de gases en zona de fusión = 1967°C (31-2)

Caso (a)

A la temperatura crítica de 1500°C

Contenido de calor en los productos de combustión, por kilogramo de C

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 5,3776 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 2702,24 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del C} = 1 \times 2430 = 2430 \text{ Kcal}$$

Incremento de calor en la chimenea = $2702,24 - 2430 = 272,24$ Kcal.

Elevacion del calor suministrado por los calores sensibles = $840,51 + 2430 + 598,13 = 3864,64$ Kcal

Nuevo incremento = $3864,64 - 2430 = 1434,64$ Kcal

Caída relativa en el consumo de C = $1 \times (272,24 / 1434,64) = 0,1897 = 19,0\%$

Caso (b)

Contenido de calor en los productos de combustion, por kilogramo de C a 1500°C =

$$= \frac{1,6711 \times 1500 + 1,214 \times 10^{-4} \times 1500^2}{1,0838} = 2565$$
 Kcal

Incremento de calor en la chimenea = $2565 - 2430 = 135$ Kcal

Elevacion del calor suministrado por Kg. de C = $3756,78 / 1,0838 = 3466,3$ Kcal

Nuevo incremento = $3466,3 - 2430 = 1036,30$ Kcal

Caída relativa del consumo de C = $1 \times (135 / 1036,3) = 0,130 = 13\%$

Caidas relativas = $19 - 13 = 6\%$ mayor en (a)

Caidas relativas del consumo de C = 6% mayor en (a) (31-3)

4

Jhonson afirma (7) que el consumo de coque (C) es en modo general inversamente proporcional, no al contenido total de calor en los gases en la zona de fusión, sino al exceso de calor representado por los incrementos frente a la potencia calorífica. De este modo

C requerido en (b) = $800 \cdot (1434,64 / 1036,6) = 1107,2$ Kg

C requerido en (b) = 1107,2 Kg. (31-4)

EJERCICIO N°32 (7)

La escoria y el arrabio de un alto horno elevaron su temperatura en la zona de fusión a 1500°C . El soplo entra al horno a 700°C . El aire en el exterior se encuentra a 28°C y está saturado con humedad. Presión barométrica = 735 mm

Asumir que el carbono, justo antes de la combustión, se encuentra a 1500°C

PREGUNTAS

1. La temperatura teórica máxima de los gases calientes en las toberas.
2. La temperatura máxima, si el soplo es enriquecido a 28% de oxígeno.
3. Compare en los dos casos, el poder relativo de fusión del horno

SOLUCION

1

Cálculo de la humedad del aire

A 28°C , la máxima presión de saturación de vapor de agua (Tabla XXIV del Apéndice) = 28,3 mm

Presión real del vapor de agua = $28,3 \times 0,5 = 14,13$ mm

Asumimos 100 m^3 de aire húmedo

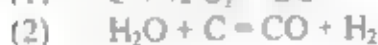
$$x = \frac{4.15 \times 10^{-5}}{100} = 0.0196 = 1.96\%$$

$$\text{Aire seco} = 100 - 1.96 = 98.04\%$$

$$\text{Volumen de H}_2\text{O} = 100 \times 0.0196 = 1.96 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire seco} = 100 \times 0.9804 = 98.04 \text{ m}^3$$

Reacciones



En (1)

$$\text{O}_2 = 98.04 \times 0.21 = 20.59 \text{ m}^3; \text{CO} = 41.18 \text{ m}^3; \text{N}_2 = 98.04 - 20.59 = 77.45 \text{ m}^3; \text{C} = 20.59 \times 12/11.2 = 22.06 \text{ Kg.}$$

En (2)

$$\text{H}_2 = \text{CO} = 1.96 \text{ m}^3; \text{C} = 1.96 \times 12/22.4 = 1.05 \text{ Kg.}; \text{H}_2\text{O} = 1.96 \times 18/22.4 = 1.575 \text{ Kg}$$

$$\text{C total} = 22.06 + 1.05 = 23.11 \text{ Kg}$$

$$\text{CO total} = 41.18 + 1.96 = 43.14 \text{ m}^3$$

Calor disponible = calor por precalentamientos + potencia calorífica del C - calor de descomposición del H₂O = contenido de calor en gases

$$\text{Calor de descomposición del H}_2\text{O} = 1.575 \times 3210 = 5056 \text{ Kcal}$$

Precalentamientos

$$\text{C} = 23.11 \times (0.2 + 1.8 \times 10^{-4} \times (1500 - 3.3 \times 10^{-4} \times 1500^2)) \times 1500 = 13719 \text{ Kcal}$$

$$\text{Aire seco} = 98.04 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 21783 \text{ Kcal}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1.96 \times (0.373 + 5 \times 10^{-7} \times 700) \times 700 = 560 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor total por precalentamientos} = 36062 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del C} \rightarrow \text{CO} = 2430 \times 23.11 = 56157 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor disponible} = 56157 + 36062 - 5056 = 87163 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor sensible en los productos de combustión

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 120.59 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

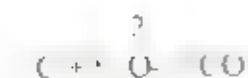
$$\text{H}_2 = 1.96 \times (0.301 + 2 \times 10^{-5} t) \cdot t =$$

$$\Sigma = 37.01 t + 2.692 \times 10^{-3} t^2$$

$$87163 = 37.01 t + 1.692 \times 10^{-3} t^2$$

$$t = 2050^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura teórica de los gases} = 2050^\circ\text{C} \quad (32-1)$$



$$\text{O}_2 = 98.04 \times 0.28 = 27.45 \text{ m}^3; \text{CO} = 54.9 \text{ m}^3; \text{C} = 27.45 \times 12/11.2 = 29.41 \text{ Kg.}; \text{N}_2 = 98.04 - 27.45 = 70.59 \text{ m}^3$$

$$\text{C total} = 29.41 + 1.05 = 30.46 \text{ Kg}$$

$$\text{CO total} = 54.9 + 1.96 = 56.86 \text{ m}^3$$

Los precalentamientos del aire seco y del agua son los mismos del caso anterior

$$\text{Precalentamiento del C} = 13719 \times (30.46/23.11) = 18082 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del C} = 30.46 \times 2430 = 74018 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor disponible} = 74018 + 18082 + 21783 + 560 - 5056 = 109387 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en los productos de combustión

$$\begin{aligned} \text{CO} + \text{N}_2 &= 127,45(0,302 + 2,2 \times 10^{-5} t) \cdot t = \\ \text{H}_2 &= 1,96(0,301 + 2 \times 10^{-5} t) \cdot t \end{aligned} \quad \Sigma = \frac{\quad}{39,08 t + 2,843 \times 10^{-3} t^2}$$

$$109387 = 39,08 t + 2,843 \times 10^{-3} t^2$$

$$t = 2385^\circ\text{C}$$

Temperatura máxima con aire enriquecido = 2385°C (32-2)

3

Disponibilidad de calor

Sin aire enriquecido = 87163 Kcal

Con aire enriquecido = 109387 Kcal

Diferencia = 109387 - 87163 = 22224 Kcal

Poder relativo de fusión = $22224 / 87163 = 0,255 = 25,5\%$

Este mismo resultado se obtiene si asumimos que el poder relativo de fusión (representado el el calor disponible), sin aire enriquecido es = 100% y calculamos a cuanto equivale el de aire enriquecido

Poder relativo con aire enriquecido = $109387 / 87163 = 1,2549 = 125,5\%$

Poder relativo con aire enriquecido = $125,5 - 100 = 25,5\%$ mayor

Poder relativo de fusión = 25,5% mayor con aire enriquecido (32-3)

EJERCICIO N°33 (7)

El siguiente mineral fue utilizado en un alto horno

Fe ₂ O ₃	78,0%	MnO	2,6%
SiO ₂	8,2	P ₂ O ₅	1,9
Al ₂ O ₃	4,0	H ₂ O	5,3

El coque tenía: 88%C; 10%SiO₂; 2%H₂O. El fundente, CaCO₃ puro

El coque totalizó tres quintos del peso de mineral, y el fundente un cuarto del peso del mineral

El horno redujo todo el fósforo, la mitad del manganeso y la quinta parte del silicio cargados. Asumir que no hay pérdida de hierro en la escoria y que absorbió el 4% de su peso en carbono.

El soplo fue de 1500 metros cúbicos, por tonelada de mineral (asumido seco)

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas del horno, basado en 1000 kilogramos de mineral
2. La composición (%) del arrabio, la escoria y el gas

SOLUCION

En continuacion se muestra el cuadro con el balance de cargas. Los respectivos cálculos se realizan mas abajo.

BALANCE DE CARGAS (33-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Minera.	1000						
	780	Fe	546,00	---	---	O	234,00
	82	Si	13,25	SiO ₂	53,6	O	15,15
	40	---	---	Al ₂ O ₃	40,0	---	---
	26	Mn	10,08	MnO	13,0	O	2,92
	19	P	8,30	---	---	O	10,70
	53	---	---	---	---	H ₂ O	53,00
Coque	600						
	528	C	21,84	---	---	C	506,16
	60	---	---	SiO ₂	60,0	---	---
	12	---	---	---	---	H ₂ O	12,00
Caliente	250						
	250	---	---	CaO	140,0	CO ₂	110,00
Nitro	1931,25						
	1481,25	---	---	---	---	N	1481,25
	450	---	---	---	---	O	450,0
TOTALES	3781,25		599,47		306,6		2875,18

$$\text{Coque} = 1000 \times 3/5 = 600 \text{ Kg}$$

$$\text{C} = 600 \times 0,88 = 528 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 600 \times 0,10 = 60 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 600 \times 0,02 = 12 \text{ Kg}$$

$$\text{CaCO}_3 = 1000 \times 1/4 = 250 \text{ Kg}$$

$$\text{Minera} = 1000 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1000 \times 0,78 = 780 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 1000 \times 0,082 = 82 \text{ Kg}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 1000 \times 0,04 = 40 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO} = 1000 \times 0,026 = 26 \text{ Kg}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 1000 \times 0,019 = 19 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1000 \times 0,053 = 53 \text{ Kg}$$

Distribución de la carga

Arrabio:

$$\text{Arrabio} = \text{Fe} + \text{C} + \text{Si} + \text{Mn} + \text{P}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 780 \times 112/160 = 546 \text{ Kg}$$

$$\text{P en arrabio} = 19 \times 62/142 = 8,30 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ total} = 60 + 82 = 142 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 42 \times 1/5 = 28,4 \text{ Kg (este lo sacamos del mineral)}$$

$$\text{Si en arrabio} = 28,4 \times 28,60 = 13,25 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO reducido} = 26 \times \frac{1}{2} = 13 \text{ Kg}$$

$$\text{Mn a arrabio} = 13 \times \frac{55}{71} = 10,08 \text{ Kg.}$$

$$\text{C a arrabio} = 546 \times 0,04 = 21,84 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del arrabio} = 546 + 13,25 + 10,08 + 8,30 + 21,84 = 599,47 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{CaO}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 142 - 28,4 = 113,6 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO a escoria} = 26 - 13 = 13 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO a escoria} = 250 \times 0,56 = 140 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 113,6 + 13 + 140 + 40 = 306,60$$

$$\text{Gas} = \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$$

$$\text{O del soplo} = 1500 \times 0,21 \times \frac{32}{22,4} = 450 \text{ Kg.}$$

$$\text{O aportado por Fe}_2\text{O}_3 = 780 - 546 = 234 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por SiO}_2 = 28,4 - 13,25 = 15,15 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por P}_2\text{O}_5 = 19 - 8,30 = 10,70 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por MnO} = 13 - 10,08 = 2,92 \text{ Kg.}$$

$$\text{O total en gas sin el del H}_2\text{O y el del CaCO}_3 = 450 + 234 + 15,15 + 10,70 + 2,92 = 712,77 \text{ Kg.}$$

$$\text{C quemado en toberas} = 528 - 21,84 = 506,16 \text{ Kg}$$

$$\text{O} \rightarrow \text{CO} = 506,16 \times \frac{16}{12} = 675 \text{ Kg}$$

$$\text{CO} = 675 \times \frac{28}{16} = 1180 \text{ Kg}$$

$$\text{O} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 = 712,77 - 675 = 37,77 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 = 37,77 \times \frac{28}{16} = 63,8 \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 \text{ formado} = 63,8 \times \frac{44}{28} = 100,3 \text{ Kg}$$

$$\text{CO en gas} = 1180 - 63,8 = 1116,2 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 = 250 - 140 = 110 \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 \text{ total en gas} = 100 + 110 = 210 \text{ Kg}$$

$$\text{H}_2\text{O en gas} = 53 + 12 = 65 \text{ Kg.}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 1500 \times 0,79 \times \frac{28}{22,4} = 1481,25 \text{ Kg.}$$

Con los cálculos realizados se conforma el balance de cargas. (33-1)

2

Composición del arrabio del arrabio: (33-2)

$$\text{Fe} = 546,00 \text{ Kg.} = 91,08\%$$

$$\text{Si} = 13,25 \text{ Kg.} = 2,21\%$$

$$\text{Mn} = 10,08 \text{ Kg.} = 1,68\%$$

$$\text{P} = 8,30 \text{ Kg.} = 1,38\%$$

$$\text{C} = 21,84 \text{ Kg.} = 3,65\%$$

$$599,47 \text{ Kg.} = 100,00\%$$

Composición de la escoria (33-2)

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 &= 113,6 \text{ Kg.} = 37,05\% \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 &= 40,0 \text{ Kg.} = 13,05\% \\
 \text{MnO} &= 13,0 \text{ Kg.} = 4,24\% \\
 \text{CaO} &= 140,0 \text{ Kg.} = 46,66\% \\
 &306,6 \text{ Kg.} = 100,00\%
 \end{aligned}$$

Composición del gas: (33-2)

$$\begin{aligned}
 \text{N}_2 &= 1481,25 \times 22,4/28 = 1185 \text{ m}^3 = 53,30\% \\
 \text{CO} &= 1116,2 \times 22,4/28 = 893 \text{ m}^3 = 39,41\% \\
 \text{CO}_2 &= 210 \times 22,4/44 = 107 \text{ m}^3 = 4,72\% \\
 \text{H}_2\text{O} &= 65 \times 22,4/18 = 81 \text{ m}^3 = 3,57\% \\
 &2266 \text{ m}^3 = 100,00\%
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°34 (7)

Un alto horno funde 900 toneladas cortas de mineral de hierro por día, utilizando 1,6 kg. de CaCO_3 por kilogramo de mineral y 0,6 kg. de coque por kilogramo de mineral, el coque contiene 85% C y 15% SiO_2 .

El mineral analizó lo siguiente

Fe_2O_3	80%	P_2O_5	1%
SiO_2	9	Al_2O_3	6
MnO	2	H_2O	2

El horno reduce a metal todo el Fe_2O_3 y el P_2O_5 cargados, también tres cuartos del MnO y un quinto del SiO_2 . El arrabio contiene 4% de carbono.

Los gases del horno contienen 26%CO y 11%CO₂

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas completo del horno, basado en libras por día.
2. La composición de la escoria y los gases

SOLUCION

En la página siguiente se presenta el balance de cargas, como resultado de los cálculos que aparecen mas abajo

1 tonelada corta = 2000 libras.

Carga (libras)

$$\begin{aligned}
 \text{Mineral} &= 900 \times 2000 = 1'800'000 \\
 \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 1'800'000 \times 0,8 = 1'440'000 \\
 \text{SiO}_2 &= \quad \quad \times 0,09 = 162'000 \\
 \text{MnO} &= \quad \quad \times 0,02 = 36'000 \\
 \text{P}_2\text{O}_5 &= \quad \quad \times 0,01 = 18'000 \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 &= \quad \quad \times 0,06 = 108'000 \\
 \text{H}_2\text{O} &= \quad \quad \times 0,02 = 36'000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Coque} &= 0,6 \times 900 \times 2000 = 1'080'000 \\
 \text{C} &= 1'080'000 \times 0,85 = 918'000 \\
 \text{SiO}_2 &= \quad \quad \times 0,15 = 162'000
 \end{aligned}$$

$$\text{Fundente} = \text{CaCO}_3 = 900 \times 2000 \times 1/6 = 300'000$$

BALANCE DE CARGAS (34-1)
(libras por día)

CARGA		PRODUCTOS					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1 800 000						
Fe ₂ O ₃	1'440 000	Fe	1'008 000	---	---	O	432 000
SiO ₂	162 000	Si	30 240	SiO ₂	97 200	O	34 560
MnO	36 000	Mn	21 000	MnO	9 000	O	6 000
P ₂ O ₅	18 000	P	7 860	---	---	O	10 140
Al ₂ O ₃	108 000	---	---	Al ₂ O ₃	108 000	---	---
H ₂ O	36 000	---	---	---	---	H ₂ O	36 000
Fundente							
CaCO ₃	300 000	---	---	CaO	168 000	CO ₂	132 000
Coque	1'080 000						
C	918 000	C	44 458	---	---	C	873 542
SiO ₂	162 000	---	---	SiO ₂	162 000	---	---
Soplo	4'638 371						
N	3'557 586	---	---	---	---	N	3'557 586
O	1'080 785	---	---	---	---	O	1'080 785
Total	7'818 371		1'111 558		544 200		6'162 613

Distribución de la carga (libras por día):

Arrabio

$$\text{Arrabio} = \text{Fe} + \text{P} + \text{Mn} + \text{Si} + \text{C}$$

$$\text{Fe a arrabio} = 1'440.000 \times 112/160 = 1'008.000$$

$$\text{O en Fe}_2\text{O}_3 = 1'440.000 - 1'008.000 = 432.000$$

$$\text{P a arrabio} = 18.000 \times 62/142 = 7.860$$

$$\text{O del P}_2\text{O}_5 = 18.000 - 7.860 = 10.140$$

$$\text{MnO reducido} = 36.000 \times 3/4 = 27.000$$

$$\text{Mn a arrabio} = 27.000 \times 55/71 = 21.000$$

$$\text{O de este} = 27.000 - 21.000 = 6.000$$

$$\text{SiO}_2 \text{ total} = 162.000 \times 2 = 324.000$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 324.000 \times 1/5 = 64.800$$

$$\text{Si a arrabio} = 64.800 \times 28/60 = 30.240$$

$$\text{O de este} = 64.800 - 30.240 = 34.560$$

$$96\% \text{ arrabio} = 1'008.000 + 7.860 + 21.000 + 30.240 = 1'067.100$$

$$\text{C a arrabio} = 1'067.000 \times 4/96 = 44.458$$

$$\text{C del coque a gas} = 918.000 - 44.458 = 873.542$$

Escoria

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MnO}$$

$$\text{CaO del CaCO}_3 = 300.000 \times 56/100 = 168.000$$

$$\text{CO}_2 \text{ de este} = 300.000 - 168.000 = 132.000$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 324.000 - 64.800 = 259.200$$

$$\text{MnO a escoria} = 36.000 - 27.000 = 9.000$$

$$\text{Escoria total} = 108.000 + 168.000 + 259.200 + 9.000 = 544.200$$

$$V_{gas} = CO + CO_2 + H_2O + N_2$$

Para calcular el volumen del gas, utilizamos la expresión (1)

$$C \text{ del } CaCO_3 = 300000 \times 0.12 = 36000$$

$$C \text{ total en gases} = 873542 + 36000 = 909542$$

$$C \text{ en gas} = (0.26 + 0.11) \times 12/359 = 0.01237 \text{ lb/ft}^3$$

$$V_{gas \text{ total}} = 909542/0.01237 = 73'541.796.85 \text{ ft}^3$$

$$C_{O_2} = 73'541.797 \times 0.26 = 19'120.867 \text{ ft}^3$$

$$C_{CO_2} = \text{""} \times 0.11 = 8'089.598 \text{ ft}^3$$

$$H_2O = 36000 \times 359/18 = 718000 \text{ ft}^3$$

$$N_2 = 73'541.797 - 19'120.867 - 8'089.598 - 718000 = 45'613.332 \text{ ft}^3 = 3'557.586 \text{ lbs}$$

$$O \text{ del soplo} = 45'613.332 \times 21.79 \times 32/359 = 1'080.785 \text{ lbs.}$$

Con los datos calculados anteriormente, se elabora el balance de cargas

Composición de la escoria: (34-2)

$$SiO_2 = 259200 \text{ lbs.} = 47.7\%$$

$$Al_2O_3 = 108000 \text{ lbs.} = 19.8\%$$

$$CaO = 168000 \text{ lbs.} = 30.8\%$$

$$MnO = \frac{9000}{544200} \text{ lbs.} = 1.7\%$$

$$544200 \text{ lbs.} = 100.0\%$$

Composición del gas: (34-3)

$$N_2 = 45'613.332 \text{ ft}^3 = 62.0\%$$

$$CO = 19'120.867 \text{ ft}^3 = 26.00\%$$

$$CO_2 = 8'089.598 \text{ ft}^3 = 11.00\%$$

$$H_2O = \frac{718'000}{73'541.797} \text{ ft}^3 = 0.98\%$$

$$73'541.797 \text{ ft}^3 = 100.00\%$$

EJERCICIO N°35 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composición

Fe	92.8%	C	3.8%	Mn	0.3%
Si	2.1	P	0.9	S	0.1

El mineral utilizado fue analizado como sigue

Fe ₂ O ₃	78.0%	Al ₂ O ₃	3.0%	P ₂ O ₅	1.9%
SiO ₂	8.2	MnO	2.6	MgO	1.2
H ₂ O	5.1				

El fundente totalizó un cuarto del peso del mineral y su composición fue

CaCO ₃	96%	SiO ₂	2%	MgCO ₃	2%
-------------------	-----	------------------	----	-------------------	----

Se utilizaron 1000 kilogramos de coque por tonelada de arrabio, y su composición fue

C	88%	FeS	2%	SiO ₂	8%	H ₂ O	2%
---	-----	-----	----	------------------	----	------------------	----

Se usó un sistema de 3 partes de CO a 1 parte de CO₂

Asumir que todo el hierro del mineral se reduce, el hierro del coque todo es escorificado. El S que no entra al arrabio, pasa a la escoria como CaS. El P que no va al arrabio, pasa a la escoria como P₂O₅.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, por tonelada de arrabio.
2. Un balance de cargas completo del horno, por tonelada de arrabio.
3. La composición (%) de la escoria y los gases

SOLUCION

1

Peso de Fe en arrabio = Peso de Fe en mineral

Fe en arrabio = $1000 \times 0,928 = 928 \text{ Kg}$

Fe en mineral = $78 \times 12,160 = 948,48 \text{ Kg}$

Mineral = $928 / 0,928 = 1000 \text{ Kg}$

Peso del mineral = 1000 Kg. (35-1)

2

El cuadro con el balance de cargas se muestra a continuación y los respectivos cálculos aparecen más adelante

BALANCE DE CARGAS (35-1)
(en kilogramos)

CARGA		PRODUCTOS					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1700						
Fe ₂ O ₃	126,4	Fe	928,0			O	398,00
SiO ₂	139,1	Si	21,0	SiO ₂	94,4	O	24,60
Al ₂ O ₃	51,0			Al ₂ O ₃	51,0		
MnO	44,2	Mn	3,0	MnO	40,3	O	0,90
P ₂ O ₅	32,3	P	9,0	P ₂ O ₅	11,3	O	12,00
MgO	20,4			MgO	20,4		
H ₂ O	86,7					H ₂ O	86,7
Fundente	425						
CaCO ₃	408			Ca	7,9	O	3,16
				CaO	217,42	CO ₂	179,52
MgCO ₃	8,5			MgO	4,05	CO ₂	4,45
SiO ₂	8,5			SiO ₂	8,50		
Coque	1000,0						
C	880,0	C	38,0			C	842,00
S O ₂	80,0			SiO ₂	80,00		
FeS	20,0	S	1,0	Fe	12,7		
				S	6,30		
H ₂ O	20,0					H ₂ O	20,00
Soplo	4245						
N	3269					N	3269,00
O	976					O	976,00
Total	7370		1000,0		554,97		58,53

Carga en kilogramos

Mineral

$$\begin{aligned} \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 1700 \times 0,78 = 1326 \\ \text{SiO}_2 &= 1700 \times 0,082 = 139,4 \\ \text{Al}_2\text{O}_3 &= 1700 \times 0,03 = 51,0 \\ \text{MnO} &= 1700 \times 0,026 = 44,2 \\ \text{P}_2\text{O}_5 &= 1700 \times 0,019 = 32,3 \\ \text{MgO} &= 1700 \times 0,012 = 20,4 \\ \text{H}_2\text{O} &= 1700 \times 0,051 = 86,7 \end{aligned}$$

$$\text{Fundente} = 1700 \times \frac{1}{4} = 425$$

$$\begin{aligned} \text{CaCO}_3 &= 425 \times 0,96 = 408 \\ \text{MgCO}_3 &= 425 \times 0,02 = 8,5 \\ \text{SiO}_2 &= 425 \times 0,02 = 8,5 \end{aligned}$$

$$\text{Coque} = 1000$$

$$\begin{aligned} \text{C} &= 1000 \times 0,88 = 880 \\ \text{SiO}_2 &= 1000 \times 0,08 = 80 \\ \text{FeS} &= 1000 \times 0,02 = 20 \\ \text{H}_2\text{O} &= 1000 \times 0,02 = 20 \end{aligned}$$

Distribución de la carga (Kilogramos)

Escoria y gases

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{CaS} + \text{FeO}$$

$$\text{Gases} = \text{N}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\begin{aligned} \text{Fe arrabio} &= \text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = 1326 \times 112/160 = 928 \\ \text{O de este} &= 1326 - 928 = 398 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Si en arrabio} &= 1000 \times 0,021 = 21 \\ \text{SiO}_2 \text{ reducido} &= 21 \times 60/28 = 45 \\ \text{O de este} &= 45 - 21 = 24 \end{aligned}$$

SiO₂ a escoria = 139,4 + 8,5 + 45 = 192,9 (el SiO₂ de la escoria lo vamos a deducir del mineral)

$$\begin{aligned} \text{Mn arrabio} &= 1000 \times 0,003 = 3 \\ \text{MnO reducido} &= 3 \times 71/55 = 3,9 \\ \text{O de este} &= 3,9 - 3 = 0,9 \\ \text{MnO a escoria} &= 44,2 - 3,9 = 40,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{P en arrabio} &= 1000 \times 0,009 = 9 \\ \text{P}_2\text{O}_5 \text{ reducido} &= 9 \times 142/62 = 21 \\ \text{O de este} &= 21 - 9 = 12 \\ \text{P}_2\text{O}_5 \text{ a escoria} &= 32,3 - 21 = 11,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MgO del (MgCO}_3) &= 8,5 \times 40/84 = 4,05 \\ \text{CO}_2 \text{ de este} &= 8,5 - 4,05 = 4,45 \\ \text{MgO a escoria} &= 20,4 + 4,05 = 24,45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fe en FeS} &= 20 \times 56/88 = 12,7 \text{ (a escoria como FeO)} \\ \text{FeO de este} &= 12,7 \times 72/56 = 16,4 \\ \text{O de este} &= 16,4 - 12,7 = 3,7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{S total} &= 0 + 3,7 + 7,3 \\ \text{S en arrabio} &= 1000 \times 0,001 = 1 \\ \text{S a escoria} &= 1 + 7,3 = 8,3 \\ \text{S a escoria} &= 8,3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ca} &\rightarrow \text{CaS} = 14,2 - 6,3 = 7,9 \\
 \text{CaO del Ca} &\rightarrow \text{CaS} = 7,9 \times 56/40 = 11,06 \\
 \text{O del CaO} &\rightarrow \text{CaS} = 11,06 - 7,9 = 3,16 \\
 \text{CaO en CaCO}_3 &= 408 \times 56/100 = 228,48 \\
 \text{CaO a escoria} &= 228,48 - 11,06 = 217,42 \\
 \text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 &= 408 - 217,42 - 3,16 - 7,9 = 179,52
 \end{aligned}$$

$$\text{CO}:\text{CO}_2 = 2,33:1$$

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2 \text{ en fundente} &= 179,52 + 4,45 = 183,97 \approx 194 \\
 \text{C en CO}_2 &194 \times 12/44 = 53 \\
 \text{O de este} &= 194 - 53 = 141 \\
 \text{C total en gas} &= 842 + 53 = 895
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C en CO} &= 895 \times 2,33/3,33 = 626,2 \\
 \text{C en CO}_2 &= 895 - 626,2 = 268,8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CO en gas} &= 626,2 \times 28/12 = 1461,1 \\
 \text{CO}_2 \text{ en gas} &= 268,8 \times 44/12 = 985,6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{O del CO} &= 1461,1 - 626,2 = 834,9 \\
 \text{O del CO}_2 &= 985,6 - 268,8 = 716,8 \\
 \text{O en CO y CO}_2 &1551,7 \\
 \text{O de reducción} &= 398 + 24 + 0,9 + 12 + 3,16 + (141 - 3,7) = 575,36 \text{ Kg.} \\
 \text{O del soplo} &= 1551,7 - 575,36 = 976,34
 \end{aligned}$$

$$\text{Soplo} = 976,34/0,23 = 4245 \text{ Kg.}$$

$$\text{N} = 4245 - 976,34 = 3268,62$$

Con estos datos se realiza la tabla con el Balance de las cargas

3

Composición de la escoria; (35-3)

SiO ₂	= 182,90 Kg.	= 32,8%
CaO	= 217,42 Kg.	= 39,0%
Al ₂ O ₃	= 51,00 Kg.	= 9,1%
MgO	= 24,45 Kg.	= 4,4%
MnO	= 40,30 Kg.	= 7,2%
P ₂ O ₅	= 11,30 Kg.	= 2,1%
CaS	= 4,20 Kg.	= 0,8%
FeO	= 16,40 Kg.	= 2,9%
	<u>557,97 Kg</u>	

Composición del gas (35-3)

N ₂	= 2615 m ³	= 59,2%
CO	= 1169 m ³	= 26,4%
CO ₂	= 502 m ³	= 11,4%
H ₂ O	= 133 m ³	= 3,0%
	<u>4419 m³</u>	

EJERCICIO N°36 (7)

Un alto horno produce arrabio de la siguiente composicion

Fe	93.4%	C	3.8%
Si	2.3	Mn	0.5

El mineral tratado presentó el siguiente análisis

Fe_2O_3	80.0%	Al_2O_3	3.5%
SiO_2	8.3	MnO_2	3.1
H_2O	5.1		

El peso del fundente fue un cuarto del peso del mineral y contenía 96% CaCO_3 y 4% SiO_2 . La cantidad de coque fue 1900 libras por tonelada de arrabio conteniendo 88% C, 8% SiO_2 y 4% H_2O .

Se utilizaron 95000 pies cúbicos de aire por tonelada de arrabio. Asumir que todo el hierro es reducido.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral, por tonelada de arrabio
2. Un balance de cargas completo del horno
3. El volumen del gas del alto horno

SOLUCION

1

Fe en arrabio = Fe en mineral

$$\text{Fe en arrabio} = 2000 \times 0.934 = 1868 \text{ libras}$$

$$\text{Fe en mineral} = 80 \times 112 / 160 = 56\%$$

$$\text{Mineral} = 1868 / 0.56 = 3336 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso del mineral} = 3336 \text{ libras por tonelada de arrabio (36 lb)}$$

2

El balance de cargas se muestra en la siguiente pagina y es el resultado de los calculos que aparecen a continuacion

Carga en libras

Mineral

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3336 \times 0.8 = 2668.8$$

$$\text{SiO}_2 = \quad \times 0.083 = 276.89$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \quad \times 0.035 = 116.76$$

$$\text{MnO}_2 = \quad \times 0.031 = 103.42$$

$$\text{H}_2\text{O} = \quad \times 0.051 = 170.14$$

$$\text{Fundente} = 3336 / 4 = 834$$

$$\text{CaCO}_3 = 834 \times 0.96 = 800.64$$

$$\text{SiO}_2 = \quad \times 0.04 = 33.36$$

$$\text{Coque} = 1900$$

$$\text{C} = 1600 \quad \text{SiO}_2 = 152 \quad \text{H}_2\text{O} = 76$$

BALANCE DE CARGAS (36-2)

CARGA (libras)		PRODUCTOS (libras)					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	3336						
Fe ₂ O ₃	2668,80	Fe	1868	---	---	O	800,80
SiO ₂	276,89	Si	46	SiO ₂	178,39	O	52,5
Al ₂ O ₃	16,76	---	---	Al ₂ O ₃	116,76	---	---
MnO ₂	103,42	Mn	10	MnO	71,70	O	21,72
H ₂ O	170,4	---	---	---	---	H ₂ O	170,14
Fluiente	854						
CaCO ₃	800,64	---	---	CaO	448,36	CO ₂	352,28
SiO ₂	33,36	---	---	SiO ₂	33,36	---	---
Coque	1900						
C	1672	C	76	---	---	C	1596,00
H ₂ O	76	---	---	---	---	H ₂ O	76,00
SiO ₂	152	---	---	SiO ₂	152	---	---
Soplo	7631,8						
N	5853,5	---	---	---	---	N	5853,5
O	1778,3	---	---	---	---	O	1778,3
Total	13701,8		2000		1000,57		10701,24

Distribución de la carga (libras)

$$\text{Si en arrabio} = 2000 \times 0,023 = 46$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 46 \times 60/28 = 98,5 \text{ (este sale del mineral)}$$

$$\text{O de este} = 98,5 - 46 = 52,5$$

$$\text{SiO}_2 \text{ del mineral} \rightarrow \text{escoria} = 276,89 - 98,5 = 178,39$$

$$\text{Total SiO}_2 \rightarrow \text{escoria} = 178,39 + 33,36 + 152 = 363,75$$

$$\text{Mn en arrabio} = 2000 \times 0,005 = 10$$

$$\text{MnO}_2 \text{ reducido} = 10 \times 87/55 = 15,5$$

$$\text{O de este} = 15,5 - 10 = 5,5$$

$$\text{MnO}_2 \rightarrow \text{MnO} = 103,42 - 15,5 = 87,92$$

$$\text{MnO} \rightarrow \text{escoria} = 87,92 \times 71/87 = 71,7$$

$$\text{O de este} = 87,92 - 71,7 = 16,22$$

$$\text{O aportado por MnO}_2 = 5,5 + 16,22 = 21,72$$

$$\text{C en arrabio} = 2000 \times 0,038 = 76$$

$$\text{C del coque} \rightarrow \text{gas} = 1672 - 76 = 1596$$

$$\text{CaO} \rightarrow \text{escoria} = 800,64 \times 0,56 = 448,36$$

$$\text{CO}_2 \text{ del CaCO}_3 = 800,64 - 448,36 = 352,28$$

$$\text{O del soplo} = 19950 \times 32/359 = 1778,3$$

$$\text{O aportado por aire y reducciones} = 1778,3 - 800,8 - 52,5 - 21,72 = 2655,02$$

Con estos datos más en N que se calcula más adelante, se estructura el balance de cargas

}

$$\text{O} \rightarrow \text{CO en toberas} = 1596 \times 16/12 = 2128$$

$$\text{CO formado} = 2128 \times 28/16 = 3724$$

$$\text{O} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 = 2655,02 - 2128 = 527,02$$

$$\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 = 527,02 \times 28/16 = 921$$

$$\text{CO}_2 \text{ formado} = 921 \times 44/28 = 1450$$

$$\text{CO en gas} = 3724 - 921 = 2803$$

$$\text{Volumen de gas} = 1450 + 352,28 = 1802,28$$

$$\text{Volumen de gas} = 70,14 + 76 = 246,14$$

$$\text{N en gas} = 95000 \times 0,79 = 75050 \text{ ft} = 5853,5 \text{ lbs}$$

$$\text{Gas} = \text{N}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen del gas} &= 75050 + 2803 \times 359,28 + 1802,28 \times 359,44 + 246,14 \times 359,18 \\ &= 130650 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen del gas} = 130650 \text{ ft}^3 / \text{ton. de arrabio (36-3)}$$

EJERCICIO N°37 (7)

Un mineral fundido en un alto horno contenía lo siguiente:

Fe_2O_3	76%	MnO_2	3%	SiO_2	11%
Al_2O_3	3	P_2O_5	1	H_2O	4
CaO	2				

El coque utilizado tenía la siguiente composición:

C	86%	SiO_2	9%
Al_2O_3	1	FeS	2
H_2O	2		

La piedra caliza analizó:

CaO	50%	MgO	5%
Al_2O_3	1	SiO_2	1
CO_2	43		

El análisis del arrabio fue el siguiente:

C	3,80%	Mn	1,05%
Si	0,90	P	0,75
Fe	93,40	S	0,10

Se cargo una tonelada de coque por tonelada de arrabio producido. Asumir que el 2% del Fe cargado se pierde en la escoria como FeO. La escoria contiene partes iguales de CaO y SiO_2 .
 82% del carbono del coque es quemado en las toberas.
 El azufre que no pasa al arrabio, entra a la escoria como CaS.
 El manganeso que no aparece en el arrabio, está en la escoria como MnO.

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas completo del horno (basado en 1000 Kg. de arrabio).
2. la composición, en porcentajes, de la escoria y los gases

SOLUCION

A continuación aparece el cuadro con el balance de cargas del horno, para 1000 Kg. de arrabio, fundamentado en los cálculos que se realizan más adelante.

BALANCE DE CARGAS (37-1)
(Kg.)

CARGA		PRODUCTOS					
		ARRABIO		ESCORIA		GASES	
Mineral	1768,0						
Fe ₂ O ₃	1343,7	Fe	921,3	FeO	24,6	O	397,8
MnO ₂	53,0	Mn	40,5	MnO	29,7	O	12,8
SiO ₂	194,5	Si	9,0	SiO ₂	175,2	O	16,3
Al ₂ O ₃	53,0			Al ₂ O ₃	53,0		
P ₂ O ₅	17,7	P	7,5	P ₂ O ₅	0,5	O	9,7
H ₂ O	70,7					H ₂ O	70,7
CaO	35,4			CaO	24,3		
				Ca	7,9	O	3,2
P. Caliza	491,6			CaO	245,8		
CaO	245,8			MgO	24,6		
MgO	24,6			Al ₂ O ₃	4,9		
Al ₂ O ₃	4,9			SiO ₂	4,9		
SiO ₂	4,9					CO ₂	211,4
CO	211,4					C	827,0
Coque	1000,0	C	38,0				
C	860,0			SiO ₂	90,0		
SiO	90,0			Al ₂ O ₃	10,0		
Al ₂ O	10,0						
FeS	20,0	Fe	12,7				
		S	0	S	6,3		
H ₂ O	20,0					H ₂ O	20,0
Soplo	40,3						
O	940,3					O	940,3
N	3112,7					N	3112,7
Total	7312,6		1000,0		701,7		5610,9

Cálculo del peso del mineral (kilogramos)

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,934 = 934$$

El 2% del Fe cargado \rightarrow FeO

$$\text{Fe cargado} = 934 / 0,98 = 953,1$$

$$\text{FeS} = 1000 \times 0,02 = 20$$

$$\text{Fe en FeS} = 20 \times 56/88 = 12,7$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = 953,1 - 12,7 = 940,4$$

Sea X = peso del mineral

$$\text{Fe en mineral} = 0,76X \times 112/160 = 0,532X = 940,4$$

$$X = \text{peso del mineral} = 940,4 / 0,532 = 1768 \text{ Kg.}$$

Carga (Kg)

Mineral

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1768 \times 0,76 = 1343,7$$

$$\text{MnO}_2 = \quad \times 0,03 = 53,0$$

$$\text{SiO}_2 = \quad \times 0,11 = 194,5$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \quad \times 0,03 = 53,0$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = \quad \times 0,01 = 17,7$$

$$\text{H}_2\text{O} = \quad \times 0,04 = 70,7; \quad \text{CaO} = 1768 \times 0,02 = 35,4$$

$$\begin{aligned}
 C &= 1000 \times 0,86 = 860 \\
 SiO_2 &= \quad \times 0,09 = 90 \\
 Al_2O_3 &= \quad \times 0,01 = 10 \\
 FeS &= \quad \times 0,02 = 20 \\
 H_2O &= \quad \times 0,02 = 20
 \end{aligned}$$

Calculo de la piedra caliza

$$\begin{aligned}
 Si \text{ en arrabio} &= 1000 \times 0,009 = 9 \\
 SiO_2 \text{ reducido} &= 9 \times 60/28 = 19,3 \\
 O \text{ de este} &= 19,3 - 9 = 10,3
 \end{aligned}$$

Sea X = peso de la piedra caliza

$$(1) \quad SiO_2 \rightarrow \text{escoria} = 194,5 + 90 + 0,01X - 19,3 = 265,2 + 0,01X$$

$$\begin{aligned}
 S \text{ cargado} &= 20 - 12,7 = 6,3 \\
 S \text{ en arrabio} &= 1000 \times 0,001 = 1 \\
 S \rightarrow CaS &= 7,3 - 1 = 6,3 \\
 CaS &= 6,3 \times 72/32 = 14,2 \\
 Ca \rightarrow CaS &= 14,2 - 6,3 = 7,9 \\
 CaO \rightarrow CaS &= 7,9 \times 56/40 = 11,1; O = 11,1 - 7,9 = 3,2 \\
 (2) \quad CaO \rightarrow \text{escoria} &= 35,4 + 0,5X - 11,1 = 24,3 + 0,5X
 \end{aligned}$$

igualando (1) y (2)

$$\begin{aligned}
 265,2 + 0,01X &= 24,3 + 0,5X \\
 X = \text{Peso de la piedra caliza} &= 491,6
 \end{aligned}$$

Piedra caliza

$$\begin{aligned}
 CaO &= 491,6 \times 0,5 = 245,8 \\
 MgO &= \quad \times 0,05 = 24,6 \\
 Al_2O_3 &= \quad \times 0,01 = 4,9 \\
 SiO_2 &= \quad \times 0,01 = 4,9 \\
 CO_2 &= \quad \times 0,43 = 211,4
 \end{aligned}$$

Productos (Kg.)

$$\text{Escoria} = FeO + MnO + SiO_2 + P_2O_5 + CaO + CaS + Al_2O_3 + MgO$$

$$\begin{aligned}
 Fe \rightarrow FeO &= 953,1 - 934 = 19,1 \\
 FeO &= 19,1 \times 72/56 = 24,4 \\
 O \text{ de este} &= 24,4 - 19,1 = 5,5 \\
 Fe \text{ del } Fe_2O_3 \rightarrow FeO &= 19,1 - 12,7 = 6,4 \\
 Fe \text{ del } Fe_2O_3 \rightarrow \text{arrabio} &= 940,6 - 19,1 = 921,3 \\
 O \text{ del } Fe_2O_3 &= 1343,7 - 940,4 = 403,3 \\
 O \text{ del } Fe_2O_3 \rightarrow \text{gas} &= 403,3 - 5,5 = 397,8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Mn \text{ en arrabio} &= 1000 \times 0,0105 = 10,5 \\
 MnO_2 \text{ reducido} &= 10,5 \times 87/55 = 16,6 \\
 O \text{ de este} &= 16,6 - 10,5 = 6,1 \\
 MnO_2 \rightarrow MnO \text{ (escoria)} &= 53 - 16,6 = 36,4 \\
 MnO \text{ en escoria} &= 36,4 \times 71/87 = 29,7 \\
 O \text{ de este (MnO}_2) &= 36,4 - 29,7 = 6,7 \\
 O \text{ aportado por el MnO}_2 &= 6,1 + 6,7 = 12,8
 \end{aligned}$$

Si en arrabio = 9

SiO₂ reducido = $9 \times 60/28 = 19,3$

O de este = $19,3 - 9 = 10,3$

SiO₂ → escoria = $194,5 + 90 + 4,9 - 19,3 = 270,1$

P en arrabio = $1000 \times 0,0075 = 7,5$

P₂O₅ reducido = $7,5 \times 142/62 = 17,2$

O de este = $17,2 - 7,5 = 9,7$

P₂O₅ → escoria = $17,2 - 17,2 = 0,5$

CaO → escoria = $24,3 + 0,5 \times 491,6 = 270,1$

Gases = CO + CO₂ + N₂

En alto horno

Reducción directa: MO + C = M + CO

Reducción indirecta: MO + CO = M + CO₂

C consumido en toberas = $860 \times 0,82 = 705,2$

O del soplo = $705,2 \times 16/12 = 940,3$

Soplo = $940,3/0,232 = 4053 \text{ Kg.}$

N = $4053 \times 0,768 = 3112,7$

O aportado por la carga sólida sin contar el CO = $32 + 10,3 + 397,8 + 12,8 + 9,7 = 433,8$

O total aportado sin CO₂ no H₂O = $940,3 + 433,8 = 1374,1$

C (reducción directa) → CO = $860 - 705,2 - 38 = 116,8$

C total → CO = $705,2 + 116,8 = 822$

O de este = $822 \times 16/12 = 1096$

CO total = $1096 \times 28/16 = 1918$

CO (reducción directa) = $116,8 \times 28/12 = 272,5$

O de este = $272,5 - 116,8 = 155,7$

O (reducción indirecta) = $433,8 - 155,7 = 278,1$

CO → CO₂ = $278,1 \times 28/16 = 486,7$

CO₂ formado = $486,7 \times 44/28 = 764,8$

CO en gas = $1918 - 486,7 = 1431,3$

CO₂ total = $764,8 + 211,4 = 976,2$

Composición de la escoria (37-2)

FeO = 24,6 Kg. = 3,5%

MnO = 29,7 Kg. = 4,2%

SiO₂ = 270,1 Kg. = 38,5%

P₂O₅ = 0,5 Kg. = 0,1%

Al₂O₃ = 67,9 Kg. = 9,7%

CaO = 270,1 Kg. = 38,5%

CaS = 14,2 Kg. = 2,0%

MgO = 24,6 Kg. = 3,5%

701,7 Kg. = 100,0%

Composición del gas (37-2)

CO = 1431,3 Kg. = 1145,04 m³ = 27,0%

CO₂ = 976,2 Kg. = 497,00 m³ = 11,7%

N₂ = 3112,7 Kg. = 2490,16 m³ = 58,6%

H₂O = 90,7 Kg. = 112,90 m³ = 2,7%

5610,9 Kg. = 4245,10 m³ = 100,0%

Composición del gas (38-3)

CO	= 453,6 m ³ = 60,3%
CO ₂	= 101,2 m ³ = 13,5%
N ₂	= 197,5 m ³ = 26,2%
Total gas	= 752,3 m ³ = 100,0%

4
Poder calorífico del carbón = $320 \times 8100 = 2'592\,000$ Kcal
Poder calorífico del gas (CO) = $453,6 \times 3034 = 1'376.222,4$ Kcal

Poder calorífico del gas = $1'376.222,4 / 2'592.000 = 0,531$
Poder calorífico del gas = 53,1% del de C (38-4)

5
Poder calorífico del gas = $0,603 \times 3034 = 1830$ Kcal/m³
Gas total = $752,3 \times 30 = 22569$ m³
Poder calorífico total del gas = $22569 \times 1830 = 41'301\,270$ Kcal./dia.
= $41'301.270 / 24 = 1'720.886$ Kcal./hr

1 Kw = 860 Kcal./hr

Kilovatios totales = $0,25 \times 1'720\,886 / 860 = 500$
Kilovatios obtenidos en las máquinas a gas = 500 (38-5)

EJERCICIO N°39 (7)

Un cubilote utilizado para producir fundición de hierro, es cargado con arrabio, fundente y coque. El fundente es CaO, puro y se cargan 25 kilogramos, por tonelada de arrabio. El coque contiene 86% C, 5% SiO₂, 7% Al₂O₃ y 2% FeO y se cargan 120 kilogramos por tonelada de arrabio.

El gas del cubilote contiene partes iguales de CO y CO₂ por volumen. El carbono del arrabio no se oxida.

La escoria contiene

FeO	11%	SiO ₂	46%
MnO	3	CaO	25
Al ₂ O ₃	15		

La fundición de hierro producida contiene 3,8%C, además de algo de manganeso y de silicio.

PREGUNTAS

1. El peso de la escoria, por tonelada de arrabio cargado.
2. El volumen de aire consumido en la oxidación del silicio, el manganeso y el hierro, por tonelada de arrabio cargado.
3. El volumen de aire consumido en la oxidación del carbono del coque, por tonelada de arrabio.
4. El volumen y composición del gas, por tonelada de arrabio.

SOLUCION

1
Al₂O₃ en coque = Al₂O₃ en escoria

Al₂O₃ en coque = $0,07 \times 120 = 8,4$ Kg.

Escoria = $8,4 + 0,15 = 56$ Kg

Peso de la escoria = 56 Kg./ton. de arrabio. (39.1)

2

FeO en coque = $120 \times 0,02 = 2,4 \text{ Kg}$ FeO en escoria = $56 \times 0,11 = 6,16 \text{ Kg}$ FeO producto de oxidación = $6,16 - 2,4 = 3,67 \text{ Kg}$ O necesario = $3,76 \times 16/72 = 0,84 \text{ Kg}$ MnO en escoria = $56 \times 0,03 = 1,68 \text{ Kg}$ O requerido para oxidar el Mn = $1,68 \times 16/71 = 0,38 \text{ Kg}$ SiO₂ cargado = $120 \times 0,05 = 6,0 \text{ Kg}$ SiO₂ en escoria = $56 \times 0,46 = 25,76 \text{ Kg}$ SiO₂ producto de oxidación = $25,76 - 6 = 19,76 \text{ Kg}$ O requerido = $19,76 \times 32/60 = 10,5 \text{ Kg}$ O del aire = $10,5 + 0,84 + 0,38 = 11,72 \text{ Kg} = 8,21 \text{ m}^3$ Aire = $8,21/0,21 = 39 \text{ m}^3$ Aire requerido para oxidar: Si, Mn y Fe = 39 m^3 (39-2)

3

C del coque = $120 \times 0,86 = 103,2 \text{ Kg}$ C del CaCO₃ = $25 \times 0,12 = 3 \text{ Kg}$ C total en gas = $103,2 + 3 = 106,2 \text{ Kg}$ C \rightarrow CO = C \rightarrow CO₂ = $106,2/2 = 53,1 \text{ Kg}$ C del coque para CO₂ = $53,1 - 3 = 50,1 \text{ Kg}$ O del CO = $53,1 \times 16/12 = 71 \text{ Kg}$ O para oxidar el C a CO₂ = $50,1 \times 32/12 = 134 \text{ Kg}$ O total para oxidar el C = $71 + 134 = 205 \text{ Kg} = 143,5 \text{ m}^3$ Aire = $143,5/0,21 = 682 \text{ m}^3$ Aire requerido para oxidar el C del coque = 682 m^3 (39.3)

4

Volumen y composición del gas (39-4)

CO = $53,1 + 71 = 124,1 \text{ Kg} = 99,5 \text{ m}^3 = 12,9\%$ CO₂ = $50,1 + 134 + 25 \times 0,44 = 195,1 \text{ Kg} = 99,5 \text{ m}^3 = 12,9\%$ N₂ = $(682 + 39) \times 0,79 = 569,6 \text{ m}^3 = 74,2\%$ Total gas = $768 \text{ m}^3 = 100,0\%$

EJERCICIO N°40 (7)

El arrabio tratado en un cubilote tenía la siguiente composición:

Fe	91,0%	C	3,6%
Si	2,0	Mn	0,7
P	0,7	Lodo	2,0

El lodo en el arrabio consistía en arena y arcilla, el cual analizado contenía 75%SiO₂ y 25%Al₂O₃. La temperatura de la fundición fue de 1300°C con un punto de fusión de 1180°C.

Se utilizaron 25 kilogramos de piedra caliza, por tonelada de arrabio, y su análisis mostró 98%CaCO₃, 1%SiO₂ y 1%Al₂O₃.

El peso del coque utilizado fue de 25 kilogramos, por tonelada de arrabio y al analizarlo contenía 90%C; 5%SiO₂; 3%Al₂O₃ y 2%FeO.

Los análisis de la escoria y los gases producidos se muestran a continuación.

Gas		Escoria	
CO ₂	14%	FeO	11%
CO	10	SiO ₂	46
N ₂	76	MnO	3
		CaO	25
		Al ₂ O ₃	15

La temperatura del gas al salir del horno fue de 440°C

PREGUNTAS

1. Los metros cúbicos de gas producido y el soplo utilizado, por tonelada de arrabio
2. Los porcentajes de Fe, Mn y Si del arrabio que fueron oxidados durante la fusión
3. El peso de la fundición producida.
4. El porcentaje de la potencia calorífica del coque representado por el contenido de calor de la fundición
5. El porcentaje de la potencia calorífica del coque perdido en los gases (a) en el calor sensible; (b) por combustión imperfecta

SOLUCION

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$$

$$\text{CaCO}_3 = 25 \times 0,98 = 24,5 \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 \text{ de este} = 24,5 \times 0,44 = 10,78 \text{ Kg}$$

Vamos a utilizar la expresion (1)

$$\text{C en CaCO}_3 = 24,5 \times 0,12 = 2,94 \text{ Kg}$$

$$\text{C en coque} = 125 \times 0,9 = 112,5 \text{ Kg}$$

$$\text{C total en gas} = 112,5 + 2,94 = 115,44 \text{ Kg}$$

$$\text{C en gas} = (0,14 + 0,10) \times 12/22,4 = 0,129 \text{ Kg./m}^3 \text{ de gas.}$$

$$\text{Gas} = 115,44/0,129 = 896 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas} = 896 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (40-1)}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = \text{N}_2 \text{ en soplo}$$

$$\text{Soplo} = 896 \times 0,76/0,79 = 862 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo} = 862 \text{ m}^3 \text{ (40-1)}$$

Para saber que cantidad de cada elemento se oxido, debemos calcular el peso de la escoria

$$\text{CaO en CaCO}_3 = \text{CaO en escoria}$$

$$\text{CaO en CaCO}_3 = 24,5 \times 0,56 = 13,72 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria} = 13,72/0,25 = 54,88 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO en escoria} = 54,88 \times 0,11 = 6,04 \text{ Kg.}$$

$$\text{FeO cargado} = 125 \times 0,02 = 2,5 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO producto de oxidación} = 6,04 - 2,5 = 3,54 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe oxidado} = 3,54 \times 56/72 = 2,75 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,91 = 910 \text{ Kg}$$

$$\text{Porcentaje de oxidación del Fe} = 100 \times (2,75/910) = 0,30$$

$$\text{Fe oxidado} = 0,30\% \text{ (40-2)}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lodo} &= 1000 \times 0,02 = 20 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en este} &= 20 \times 0,75 = 15 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en fundente} &= 25 \times 0,01 = 0,25 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en coque} &= 125 \times 0,05 = 6,25 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ total cargado} &= 15 + 0,25 + 6,25 = 21,50 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ en escoria} &= 54,88 \times 0,46 = 25,25 \text{ Kg} \\
 \text{SiO}_2 \text{ producto de oxidación} &= 25,25 - 21,50 = 3,75 \text{ Kg} \\
 \text{Si oxidado} &= 3,75 \times 28,60 = 1,75 \text{ Kg} \\
 \text{Si del arrabio} &= 1000 \times 0,02 = 20 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Porcentaje de oxidación del Si} &= 100 \times (1,75/20) = 8,75 \\
 \text{Si oxidado} &= 8,75\% \text{ (40-2)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{MnO en escoria} &= 54,88 \times 0,03 = 1,65 \text{ Kg} \\
 \text{Mn oxidado} &= 1,65 \times 55/71 = 1,28 \text{ Kg} \\
 \text{Mn en arrabio} &= 1000 \times 0,007 = 7 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Porcentaje de oxidación del Mn} &= 100 \times (1,28/7) = 18,2\% \\
 \text{Mn oxidado} &= 18,2\% \text{ (40-2)}
 \end{aligned}$$

3

$$\text{Fundición de hierro} = \text{Fe} + \text{C} + \text{Si} + \text{Mn} + \text{P}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fe} &= 910 - 2,75 = 907,25 \text{ Kg} \\
 \text{C} &= 1000 \times 0,036 = 36 \text{ Kg} \\
 \text{Si} &= 20 - 1,75 = 18,35 \text{ Kg} \\
 \text{Mn} &= 7 - 1,28 = 5,72 \text{ Kg} \\
 \text{P} &= 1000 \times 0,07 = 7 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fundición} &= 907,25 + 36 + 18,35 + 5,72 + 7 = 874,22 \text{ Kg} \\
 \text{Peso de la fundición} &= 874,22 \text{ Kg/ton. de arrabio (40-3)}
 \end{aligned}$$

4

$$\text{Potencia calorífica del coque} = 8100 \times 0,9 \times 125 = 911250 \text{ Kcal}$$

En la Tabla XVII del Apéndice, aparecen los datos siguientes

Contenido de calor (por encima de 0°C) del arrabio (o fundición) líquido en su punto de fusión
230 Kcal/Kg

Calor específico del líquido = 0,15

$$\text{Contenido de calor de la fundición} = 974 \times 230 + 974 \times 0,15 \times (1300 - 1180) = 241552 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contenido de calor de la fundición} &= 241552/911250 = 0,265 \\
 \text{Contenido de calor de la fundición} &= 26,5\% \text{ de la P.C.B del coque (40-4)}
 \end{aligned}$$

5 a

Calor sensible en el gas

$$\begin{aligned}
 \text{CO}_2 &= 0,14 \times 896 \times (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 440) \times 440 = 24594 \text{ Kcal} \\
 \text{CO} + \text{N}_2 &= 0,86 \times 896 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 440) \times 440 = 105674 \text{ Kcal} \\
 \text{Calor sensible total en el gas} &= 130268 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Calor perdido en el gas} &= 130268/911250 = 0,143 \\
 \text{Calor perdido en el gas} &= 14,3\% \text{ de P.C.B del coque. (40-5.a)}
 \end{aligned}$$

5 b

La reacción de combustión incompleta es

$$C \text{ en } CO = 896 \times 12/22,4 = 48 \text{ Kg}$$

$$\text{Calor de combustión} = 48 \times 2430 = 116640 \text{ Kcal}$$

La reacción de combustión completa es:



$$\text{Calor de combustión} = 48 \times 8100 = 388800 \text{ Kcal}$$

$$\text{Pérdida por combustión imperfecta} = 388800 - 116640 = 272160 \text{ Kcal}$$

$$\text{Pérdida por combustión imperfecta} = 272160/911250 = 0,299$$

$$\text{Pérdida por combustión imperfecta} = 29,9\% \text{ de O.C.B del coque (40-5 b)}$$

EJERCICIO N°41 (7)

Un cubilote procesa por hora 15 toneladas cortas de una fundición de hierro que contiene

C	3,5%	Mn	0,8%
Si	2,2	P	0,7

Adicionalmente procesa 5 toneladas cortas de una chatarra que contiene:

C	3,0%	Mn	1,1%
Si	1,8	P	0,2

El soplo es computado sobre las bases de 30000 pies cúbicos, medidos a 40°C, requeridos para fundir 1 tonelada de hierro y chatarra cargados por minuto. Asumir que el aire está seco.

En la fusión se oxidan 20% del Si cargado en la fundición de hierro y la chatarra, 15% del Mn, 1% del Fe y no hay oxidación del P, 5% del C también se oxida, pero 1% del C del coque es absorbido por el hierro en la fundición.

Se carga suficiente $CaCO_3$ para producir una escoria con 30% CaO . El coque tiene 92% C, 8% SiO_2 y la relación del peso del coque al peso del arrabio y la chatarra cargados es 1/9

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas del cubilote para 5 horas de operación.
2. La composición (%) de la fundición, la escoria y los gases resultantes

SOLUCION

El cuadro con el balance de cargas del horno, aparece en la página siguiente, apoyado en los cálculos que se dan más abajo.

$$\text{Fundición cargada en 5 horas} = 5 \times 15 \times 2000 = 150000 \text{ libras}$$

$$C = 150000 \times 0,035 = 5250$$

$$Si = \quad \quad \times 0,022 = 3300$$

$$Mn \quad \quad \times 0,008 = 1200$$

$$P = \quad \quad \times 0,007 = 1050$$

$$Fe = \quad \quad \times 0,928 = 139200$$

BALANCE DE CARGAS (41-1)
(libras)

CARGA		PRODUCTOS					
		FUNDICION		ESCORIA		GASES	
Arrabio	150000						
C	5250	C	4987,5	--	--	C	262,5
Si	3300	Si	2640,0	Si	660,0	--	--
Mn	1200	Mn	1020,0	Mn	180,0	--	--
P	1050	P	1050,0	--	--	--	--
Fe	139200	Fe	137808,0	Fe	1392,0	--	--
Chatarra	50000						
C	1500	C	1425,0	--	--	C	75,0
Si	900	Si	720,0	Si	180,0	--	--
Mn	550	Mn	467,5	Mn	82,5	--	--
P	100	P	100,0	--	--	--	--
Fe	46950	Fe	46480,5	Fe	469,5	--	--
Coque	22222						
C	20444	C	204,4	--	--	C	20239,6
SiO ₂	1778	--	--	SiO ₂	1778,0	--	--
CaCO ₃	4829,3	--	--	CaO	2704,4	CO ₂	2124,9
Soplo	210204						
N	161224	--	--	--	--	N	161224,0
O	48980	--	--	O	1568,0	O	47412,0
Total	437255,3		196902,9		9014,4		231338,0

Chatarra cargada = $5 \times 5 \times 2000 = 50000$ libras.

$$\text{Fe} = 50000 \times 0,939 = 46950$$

$$\text{C} = " \times 0,030 = 1500$$

$$\text{Si} = " \times 0,018 = 900$$

$$\text{Mn} = " \times 0,011 = 550$$

$$\text{P} = " \times 0,002 = 100$$

$$\text{Arrabio} + \text{chatarra} = 150000 + 50000 = 200000 \text{ libras}$$

$$\frac{\text{Coque}}{200000} = \frac{1}{9} \therefore \text{peso del coque} = 200000 / 9 = 22222 \text{ libras.}$$

Coque = 22222 libras:

$$\text{C} = 22222 \times 0,92 = 20444$$

$$\text{SiO}_2 = 22222 \times 0,08 = 1778$$

Distribución de la carga:

$$\text{Si (chatarra + fundición)} = 3300 + 900 = 4200$$

$$\text{Si oxidado a SiO}_2 = 4200 \times 0,20 = 840$$

$$\text{SiO}_2 \text{ formado} = 840 \times 60/28 = 1800$$

$$\text{Si total a escoria} = 1800 + 1778 = 3578$$

$$\text{Si en fundición final} = 4200 - 840 = 3360$$

$$\text{Si de arrabio} \rightarrow \text{SiO}_2 = 840 \times 3300/4200 = 660$$

$$\text{Si de chatarra} \rightarrow \text{SiO}_2 = 840 \times 900/4200 = 180$$

$$\text{Si de arrabio} \rightarrow \text{fundición final} = 3300 - 660 = 2640$$

$$\text{Si de chatarra} \rightarrow \text{fundición final} = 900 - 180 = 720$$

$$\text{SiO}_2 \text{ procedente del arrabio} = 660 \times 60/28 = 1414,3$$

$$\text{SiO}_2 \text{ procedente de la chatarra} = 180 \times 60/28 = 385,7$$

$$\text{Mn (arrabio + chatarra)} = 1200 + 550 = 1750$$

$$\text{Mn oxidado} = 1750 \times 0,15 = 262,5$$

$$\text{MnO de este} = 262,5 \times 71/55 = 338,9$$

$$\text{Mn en fundición final} = 1750 - 262,5 = 1487,5$$

$$\text{Mn del arrabio} \rightarrow \text{MnO} = 252,5 \times 1200/1750 = 180$$

$$\text{Mn de la chatarra} \rightarrow \text{MnO} = 262,5 \times 500/1750 = 82,5$$

$$\text{Mn del arrabio} \rightarrow \text{fundición final} = 1200 - 180 = 1020$$

$$\text{Mn de la chatarra} \rightarrow \text{fundición final} = 550 - 82,5 = 467,5$$

$$\text{MnO procedente de arrabio} = 180 \times 71/55 = 232,4$$

$$\text{MnO procedente de la chatarra} = 82,5 \times 71/55 = 106,5$$

$$\text{P} \rightarrow \text{fundición final} = 1050 + 100 = 1150$$

$$\text{Fe (arrabio + chatarra)} = 139200 + 46950 = 186150$$

$$\text{Fe oxidado} = 186150 \times 0,01 = 1861,5$$

$$\text{FeO de este} = 1861,5 \times 72/56 = 2393,4$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{fundición final} = 186150 - 1861,5 = 184288,5$$

$$\text{Fe del arrabio} \rightarrow \text{FeO} = 1861,5 \times 139200/186150 = 1392$$

$$\text{Fe de la chatarra} \rightarrow \text{FeO} = 1861,5 \times 46950/186150 = 469,5$$

$$\text{Fe del arrabio} \rightarrow \text{fundición final} = 139200 - 1392 = 137808$$

$$\text{Fe de la chatarra} \rightarrow \text{fundición final} = 46950 - 469,5 = 46480,5$$

$$\text{FeO procedente del arrabio} = 1392 \times 72/56 = 1789,7$$

$$\text{FeO procedente de la chatarra} = 469,5 \times 72/56 = 603,6$$

$$\text{C (arrabio + chatarra)} = 5250 + 1500 = 6750$$

$$\text{C de estos oxidado} = 6750 \times 0,05 = 337,5$$

$$\text{C del coque oxidado} = 20444 \times 0,99 = 20239,6$$

$$\text{C total oxidado} = 20239,6 + 337,5 = 20577,1$$

$$\text{C (arrabio + chatarra)} \rightarrow \text{fundición final} = 6750 - 337,5 = 6412,5$$

$$\text{C total} \rightarrow \text{fundición final} = 6412,5 + 20444 \times 0,01 = 6616,94$$

$$\text{C del arrabio oxidado} = 337,5 \times 5250/6750 = 262,5$$

$$\text{C de la chatarra oxidado} = 337,5 \times 1500/6750 = 75$$

$$\text{C del arrabio} \rightarrow \text{fundición final} = 5250 - 262,5 = 4987,5$$

$$\text{C de la chatarra} \rightarrow \text{fundición final} = 1500 - 75 = 1425$$

$$\text{C del coque} \rightarrow \text{fundición final} = 20444 \times 0,01 = 204,44$$

Con los datos calculados hasta ahora mas algunos que apareceran mas adelante, se configura el balance de cargas del horno

Composición de la fundición final (41-2)

$$\text{Fe} = 184288,5 \text{ libras} = 93,62\%$$

$$\text{Si} = 3300,0 \text{ " } = 1,68\%$$

$$\text{Mn} = 1487,5 \text{ " } = 0,76\%$$

$$\text{P} = 1150,0 \text{ " } = 0,58\%$$

$$\text{C} = 6616,9 \text{ libras} = 3,36\%$$

$$196842,9 \text{ libras} = 100,00\%$$

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{CaO}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 3578 + 338,9 + 2393,4 = 6310,3 = 70\%$$

$$\text{Escoria total} = 6310,3/0,7 = 9014,7$$

$$\text{CaO} = 9014,7 - 6310,3 = 2704,4$$

$$\text{CaCO}_3 = 2704,4 \times 100/56 = 4829,3$$

$$\text{CO}_2 \text{ de este} = 4829,3 - 2704,4 = 2124,9$$

Composición de la escoria (41-2)

FeO	2393,4 libras	= 26,55%
SiO ₂	3578,0 "	= 39,69%
MnO	338,9 "	= 3,76%
CaO	2704,4 "	= 30,00%
	9014,7 libras	= 100,00%

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$$

Cálculo del soplo

$$\text{Arrabio} + \text{chatarra} = 15 + 5 = 20 \text{ ton./min}$$

$$\text{Soplo} = 30000 \frac{\text{ft}^3}{\text{ton.} \cdot \text{min}}$$

$$\text{Soplo total} = 30000 \times (\text{ft}^3/\text{ton.} \cdot \text{min}) \times 20 \times (\text{ton.} \cdot \text{hr}) \times 5 \text{ hr} = 3'000'000 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Oxígeno utilizado en oxidación de elementos

$$\text{O para FeO} = 2393,4 \times 16/72 = 531,9$$

$$\text{O para SiO}_2 = 1800 \times 32/60 = 960,0$$

$$\text{O para MnO} = 338,8 \times 16/71 = \underline{76,4}$$

1568,3 libras

$$\text{Oxígeno para oxidación de elementos} = 1568,3 \times (359/32) = 15594,4 \text{ ft}^3 \text{ en 5 horas.}$$

Cambio del soplo a condiciones normales.

$$T_1 = 40 + 273 = 313\text{K} \quad T_2 = 273\text{K}$$

$$V_1 = 3'000'000 \text{ ft}^3 \quad V_2 = ?$$

$$V_2 = V_1 \times (T_2/T_1) = 2'616.613 \text{ ft}^3$$

$$\text{N}_2 = 2'616.613 \times 0,79 = 2'067.124$$

$$\text{O}_2 = \quad \quad \times 0,21 = 549.489$$

La reacción que ocurre en el cubilote en la zona de toberas es



$$\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 = 549489 - 17595 = 531894 \text{ ft}^3$$

$$\text{C} = 531894 \times 12/359 = 17779 \text{ lbs.}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 20577 - 17779 = 2798$$

La formación del CO se produce de acuerdo a la siguiente reacción



$$\text{CO} = 2798 \times 2 \times 359/12 = 167414 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ de este} = 167414/2 = 83707 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ en gas} = 531894 - 83707 + 2124,9 \times 359/44 = 465524 \text{ ft}^3$$

Composición del gas (41-2)

$$\text{N}_2 = 2'067.124 \text{ ft}^3 = 76,56\%$$

$$\text{CO}_2 = 465.524 \text{ ft}^3 = 17,24\%$$

$$\text{CO} = 167.414 \text{ ft}^3 = 6,20\%$$

$$2'700.062 \text{ ft}^3 = 100,00\%$$

EJERCICIO N°42 (9)

Un producto sinterizado que ha de ser tratado en un alto horno analiza 8%CaO

A fundir este sinterizado se desea producir una escoria con CaO, FeO y SiO₂ en las proporciones de

$$\text{CaO} : \text{FeO} : \text{SiO}_2 = 4 : 6 : 7$$

Para obtener esta escoria, se añaden a la carga mineral de hierro y piedra caliza de las siguientes composiciones

	%Fe	%CaO	%SiO ₂
Mineral de Fe:	45,0	0,5	15,0
Piedra caliza:	2,0	46,0	8,0

Además se añade a la carga, coque como combustible, en una cantidad igual al 12% del peso de sinterizado + mineral de Fe + piedra caliza.

El coque contiene: 2,5%Fe₂O₃; y 12,0%SiO₂

Supongamos que toda la caliza, Fe y SiO₂ pasan a la escoria como CaO, FeO y SiO₂

PREGUNTAS

- Calcular los pesos del mineral de hierro, la piedra caliza y el coque a emplear por toneladas de sinterizado

SOLUCION

$$\text{Sinterizado} = 2000 \text{ libras}$$

$$\text{CaO} = 2000 \times 0,08 = 160$$

$$\text{SiO}_2 = 2000 \times 0,25 = 500$$

$$\text{Fe} = 2000 \times 0,15 = 300$$

Para este cálculo vamos a utilizar el método algebraico. El sistema de ecuaciones que utilizaremos más adelante, se apoyará en consideraciones como las siguientes

$$\text{Relacion CaO : FeO : SiO}_2 = 4 : 6 : 7$$

$$6 \times \text{peso de SiO}_2 = 7 \times \text{peso de FeO}$$

$$4 \times \text{peso de SiO}_2 = 7 \times \text{peso de CaO}$$

Sean

X = peso del mineral de hierro

Y = peso de la piedra caliza

$$\text{Peso del coque} = 0,12 \times (2000 + X + Y) = 240 + 0,12X + 0,12Y$$

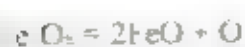
Cálculo del FeO formado

$$\text{FeO del sinterizado} = 300 \times 72/56 = 85,71 \text{ libras}$$

$$\text{FeO del mineral de Fe} = 0,45X \cdot (72/56) = 0,5786X \text{ libras}$$

$$\text{FeO de la piedra caliza} = 0,02Y \cdot (72/56) = 0,0357Y \text{ libras}$$

Para el coque



$$\text{FeO del coque} = (240 + 0,12X + 0,12Y) \times 0,025 \times 144/160 = 5,4 + 0,0027X + 0,0027Y$$

$$\begin{aligned}\text{FeO total formado} &= 385,71 + 0,5786X + 0,0257Y + 5,4 + 0,0027X + 0,0027Y \\ &= 391,11 + 0,5813X + 0,0284Y\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{SiO}_2 \text{ cargado} &= 500 + 0,15X + 0,08Y + 0,12 \cdot (240 + 0,12X + 0,12Y) \\ &= 528,8 + 0,1644X + 0,0944Y\end{aligned}$$

$$\text{CaO cargado} = 160 + 0,005X + 0,46Y$$

De conformidad con las relaciones establecidas anteriormente

$$(1) \quad 6 \times (528,8 + 0,1644X + 0,0944Y) = 7 \times (391,11 + 0,5813X + 0,0284Y)$$

$$(2) \quad 4 \times (528,8 + 0,1644X + 0,0944Y) = 7 \times (160,00 + 0,0050X + 0,46Y)$$

Desarrollando y despejando, obtendremos el siguiente sistema de ecuaciones

$$(1) \quad 453,03 = 3,0827X - 0,3676Y$$

$$(2) \quad 995,20 = -0,6226X + 2,8424Y$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones obtenemos

$$X = 187,78 \text{ libras}$$

$$Y = 391,26 \text{ libras}$$

$$\text{Coque} = 0,12 \times (2000 + 187,78 + 391,26) = 309,5 \text{ libras}$$

$$\text{Peso del mineral de hierro} = 187,78 \text{ libras (42-1)}$$

$$\text{Peso de la piedra caliza} = 391,26 \text{ libras (42-1)}$$

$$\text{Peso del coque} = 309,5 \text{ libras (42-1)}$$

CAPITULO VIII
PRODUCCION DE ACEROS

EJERCICIO N°1 (7)

En un convertidor Bessemer-acido trata 5 toneladas de arrabio en 12 minutos. Se oxidan las siguientes impurezas

C	4.0%
Si	1.8
Mn	0.8

Tambien se oxida el 3 % del hierro. Asumir que el hierro es oxidado a una rata uniforme y que tres cuartos del C pasan a CO y un cuarto a CO₂

PREGUNTAS

- 1 El volumen de aire requerido
- 2 La duraci3n de cada uno de los dos periodos del soplado
- 3 El peso de la escoria producida

SOLUCION

1

En este proceso, el arrabio se carga al convertidor en estado liquido y se introduce un soplo de aire frio con el fin de oxidar todas las impurezas. A pesar de que no se carga ningun combustible, la carga y los productos se mantienen liquidos debido al calor generado por la oxidacion de las impurezas.

Se tratan en este tipo de convertidores, arrabios con muy poco o ningun P, pero altos en Si.

El proceso bessemer-acido se considera dividido en 2 periodos, el primero incluye la oxidacion de todo el Si y el Mn, que por tener relativamente mayor afinidad por el oxigeno que el C, se oxidan primero. Durante el segundo periodo se oxida el C. Ocurre la gran oxidacion del Fe en virtud de la gran cantidad que hay de este elemento en el arrabio y para efectos de calculos, se asume que este se oxida a una rata uniforme durante c/u de los dos periodos.

Con estas aclaraciones, procedamos a realizar los respectivos calculos

$$\text{Arrabio} = 15000 \text{ Kg}$$

$$\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 = 15000 \times 0,018 = 270 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 270 \times 32/28 = 309 \text{ Kg}$$

$$\text{Mn} \rightarrow \text{MnO} = 15000 \times 0,008 = 120 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 120 \times 16/55 = 35 \text{ Kg}$$

$$\text{C en arrabio} = 15000 \times 0,04 = 600 \text{ Kg}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 600 \times 3/4 = 450 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 450 \times 16/12 = 600 \text{ Kg}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 600 - 450 = 150 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 150 \times 32/12 = 400 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 100 - 4 - 1,8 - 0,8 = 93,4\%$$

$$\text{Fe en arrabio} = 15000 \times 0,934 = 14010 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 14010 \times 0,03 = 420,3 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 420,3 \times 16/56 = 120 \text{ Kg}$$

$$\text{O total para oxidaci3n} = 309 + 35 + 600 + 400 + 120 = 1464 \text{ Kg} = 1024,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1024,8 \times 0,21 = 4880 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire requerido} = 4880 \text{ m}^3 (1-1)$$

Para este caso distribuímos el tiempo total del proceso proporcionalmente al oxígeno empleado y consumido en cada periodo y como el Fe se oxida a rata uniforme durante todo el proceso, a cada periodo le corresponderá una proporción proporcional de oxidación de este elemento

Primer periodo = oxidación del Si + Mn + algo de Fe

O del Mn + Si = 309 + 35 = 344 Kg.

Tiempo del primer periodo sin oxidación de Fe = $12 \times (344/1464) = 2,82 \text{ min}$

O del CO + CO₂ = 600 + 400 = 1000 Kg

Tiempo del segundo periodo sin oxidación del Fe = $12 \times (1000/1464) = 8,20 \text{ min}$

Tiempo del 1° + 2° periodos sin oxidación del Fe = $2,82 + 8,20 = 11,02 \text{ min}$

O del Fe = 120 Kg

Tiempo de oxidación del Fe = $12 \times (120/1464) = 0,98 \text{ min}$

Tiempo del 1° periodo con oxidación del Fe = $2,82 + 0,98 \times (2,82/11,02) = 3,1 \text{ min}$

Tiempo total del 1° periodo = 3,1 min. (1-2)

Tiempo del 2° periodo con oxidación del Fe = $8,20 + 0,98 \times (8,20/11,02) = 8,9 \text{ min}$

Tiempo total del 2° periodo = 8,9 min. (1-2)

3

Escoria = SiO₂ + MnO + FeO

SiO₂ = 270 + 309 = 579,0 Kg

MnO = 120 + 35 = 155,0 Kg

FeO = 420,3 + 120 = 540,3 Kg

1274,3 Kg

Peso de la escoria producida = 1274,3 Kg. (1-3)

EJERCICIO N°2 (7)

Un convertidor Bessemer ácido sopla 25 toneladas métricas de un arrabio que tiene la siguiente composición

C 4,0%
Mn 1,2
Si 1,4
Fe 93,4

Además de las impurezas se oxida hierro equivalente al 2,5% del peso del arrabio, el cual es oxidado a una rata uniforme. Cinco octavos del carbono pasan a CO y tres octavos pasan a CO₂.

El sopleo es suministrado a la rata de 700 metros cúbicos por minuto, medido a condiciones normales.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado
2. El tiempo de cada uno de los dos periodos
3. El peso de la escoria

SOLUCION

1

El aire es utilizado solo para oxidar elementos y producir escoria

Arrabio = 25000 Kg

 $C = 25000 \times 0,04 = 1000 \text{ Kg}$ $C \rightarrow CO = 1000 \times 5/8 = 625 \text{ Kg}$ $C \rightarrow CO_2 = 1000 \times 3/8 = 375 \text{ Kg}$ $Mn = 25000 \times 0,012 = 300 \text{ Kg}$ $Si = 25000 \times 0,014 = 350 \text{ Kg}$ $Fe \text{ oxidado} = 25000 \times 0,025 = 625 \text{ Kg}$ $O \text{ del } CO = 625 \times 16/12 = 833,3 \text{ Kg}$ $O \text{ del } CO_2 = 375 \times 32/12 = 1000 \text{ Kg}$ $O \text{ para oxidación del } Mn = 300 \times 16/55 = 87,3 \text{ Kg}$ $O \text{ para oxidación del } Si = 350 \times 32/28 = 400 \text{ Kg}$ $O \text{ para oxidación del } Fe = 625 \times 16/56 = 178,5 \text{ Kg}$ $O \text{ total consumido} = 833,3 + 1000 + 87,3 + 400 + 178,5 = 2499,1 \text{ Kg} = 1749,37 \text{ m}^3$ $Aire = 1749,37/0,21 = 8330,3 \text{ m}^3$ **Volumen de aire utilizado = 8330,3 m³ (2-1)**

2

Rata de suministro de oxígeno = $700 \times 0,21 = 147 \text{ m}^3/\text{min}$ Rata de suministro de oxígeno = $147 \times 32/22,4 = 210 \text{ Kg./min}$

Durante el primer periodo hay oxidación del Si + Mn + algo de Fe

 $O \text{ del 1}^\circ \text{ periodo sin oxidación de Fe} = 400 + 87,3 = 487,3 \text{ Kg}$ Durante el 2º periodo hay oxidación del C (a CO y CO₂) + algo de Fe $O \text{ del 2}^\circ \text{ periodo sin oxidación del Fe} = 1000 + 833,3 = 1833,3 \text{ Kg}$ $O \text{ de oxidación del Fe} = 178,5 \text{ Kg}$ $\text{Tiempo del 1}^\circ \text{ periodo sin oxidación del Fe} = 487,3/210 = 2,32 \text{ min}$ $\text{Tiempo del 2}^\circ \text{ periodo sin oxidación del Fe} = 1833,3/210 = 8,74 \text{ min}$ $\text{Tiempo total sin oxidación del Fe} = 2,32 + 8,74 = 11,06 \text{ min}$ $\text{Tiempo de oxidación del Fe} = 178,5/210 = 0,85 \text{ min}$ $\text{Tiempo total del 1}^\circ \text{ periodo con oxidación del Fe} = 2,32 + 0,85 \times 2,32/11,06 = 2,5 \text{ min}$ **Tiempo del 1º periodo = 2,5 min. (2-2)** $\text{Tiempo total del 2}^\circ \text{ periodo con oxidación del Fe} = 8,74 + 0,85 \times 8,74/11,06 = 9,4 \text{ min}$ **Tiempo del 2º periodo = 9,4 min. (2-2)**

3

Escoria = SiO₂ + MnO + FeO $MnO = 300 + 87,3 = 387,3 \text{ Kg}$ $SiO_2 = 350 + 400 = 750,0 \text{ Kg}$ $FeO = 625 + 178,5 = 803,5 \text{ Kg}$ **1940,8 Kg****Peso de la escoria = 1941,0 Kg. (2-3)**

EJERCICIO N°3 (7)

Un convertidor Bessemer es cargado con 18 toneladas métricas de arrabio, del cual son dadas las siguientes impurezas:

C	1,2%
Si	1,5
Mn	0,7

Se oxida también suficiente hierro como para producir una escoria con 24%FeO. Asumir que el hierro se oxida a una tasa uniforme. La relación de CO a CO₂ en los gases es 3.1

Las máquinas de soplado suministran por minuto 510 metros cúbicos de aire (medidos a condiciones normales), el aire lleva 19 mm de vapor de agua.

PREGUNTAS

1. El tiempo de cada uno de los dos periodos del soplo
2. El peso de la escoria
3. la composición (%) de los gases en cada periodo

SOLUCION

Debemos calcular el peso de la escoria, para poder determinar la cantidad de FeO producido

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{FeO}$$

$$\text{Si oxidado} = 18000 \times 0,015 = 270 \text{ Kg.}$$

$$\text{O de este} = 270 \times 32/28 = 309 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ producido} = 270 + 309 = 579 \text{ Kg.}$$

$$\text{Mn oxidado} = 18000 \times 0,007 = 126 \text{ Kg.}$$

$$\text{O de este} = 126 \times 16/55 = 36,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{MnO producido} = 126 + 36,6 = 162,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{Escoria sin FeO} = 579 + 162,6 = 741,6 \text{ Kg.} = 76\%$$

$$\text{FeO} = 741,6 \times 24/76 = 234,2 \text{ Kg.}$$

$$\text{O de este} = 234,2 \times 16/72 = 52,04 \text{ Kg.}$$

$$\text{C oxidado} = 18000 \times 0,042 = 756 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 756 \times 3/4 = 567 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 756 \times 1/4 = 189 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del CO} = 567 \times 16/12 = 756 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del CO}_2 = 189 \times 32/12 = 504 \text{ Kg.}$$

$$\% \text{ de humedad} = 100 \times 19/760 = 2,5\%$$

$$\text{Aire seco} = 510 \times 0,975 = 497,25 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{O}_2 \text{ del aire} = 497,25 \times 0,21 = 104,42 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{O del aire} = 104,42 \times 22,4/32 = 149 \text{ Kg./min}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 510 - 497,25 = 12,75 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{O del H}_2\text{O} = 12,75 \times 16/22,4 = 9,11 \text{ Kg./min}$$

$$\text{O total cargado} = 149 + 9,11 = 158,11 \text{ Kg./min}$$

Tiempo del 1º período sin O del FeO = $(309 + 36,6) / 158,11 = 2,18 \text{ min}$

Tiempo del 2º período sin O del FeO = $(756 + 504) / 158,11 = \frac{7,97 \text{ min.}}{10,15 \text{ min}}$

Tiempo para oxidación del Fe = $52,04 / 158,11 = 0,33 \text{ min}$

Tiempo total del 1º período = $2,18 + 0,33 \times (2,18 / 10,15) = 2,3 \text{ min}$
Tiempo del 1º período = 2,3 min. (3-1)

Tiempo total del 2º período = $7,97 + 0,33 \times (7,97 / 10,15) = 8,2 \text{ min}$
Tiempo del 2º período = 8,2 min. (3-1)

$\text{Fe} = 234,2 \text{ Kg.} = 24\% \text{ de la escoria}$
Escoria = $234,2 / 0,24 = 976 \text{ Kg}$

Peso de la escoria = 976 Kg. (3-2)

Gases producidos durante el 1º período = $\text{N}_2 + \text{H}_2$

Composición del gas producido durante el 1º período (3-3)

$\text{N}_2 = 497,25 \times 0,79 \times 2,3 = 903,5 \text{ m}^3 = 96,9\%$
 $\text{H}_2 = 12,75 \times 2,3 = \frac{29,3 \text{ m}^3}{932,8 \text{ m}^3} = \frac{3,1\%}{100,0\%}$

Gas producido durante el 2º período = $\text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2$

Composición del gas producido durante el 2º período (3-3)

$\text{N}_2 = 497,25 \times 0,79 \times 8,2 = 3221,1 \text{ m}^3 = 68,0\%$
 $\text{H}_2 = 12,75 \times 8,2 = 104,6 \text{ m}^3 = 2,2\%$
 $\text{CO} = 567 \times 22,4 / 12 = 1058,4 \text{ m}^3 = 22,4\%$
 $\text{CO}_2 = 189 \times 22,4 / 12 = \frac{352,8 \text{ m}^3}{4736,9 \text{ m}^3} = \frac{7,4\%}{100,0\%}$

Notese que en los gases de 2º período, se sigue conservando la relación $\text{CO} : \text{CO}_2 = 3 : 1$

EJERCICIO N°4 (7)

Un convertidor Bessemer ácido sopla 30 toneladas cortas de un arrabio que contiene 3,72% C, 2,18% Si, 1,24% Mn. En adición se oxida Fe en una cantidad equivalente al 4,8% de peso del arrabio. Asumir que el Fe es oxidado a una rata uniforme durante el soplado.

El aire entra a una presión de 2,5 atmósferas, manómetro, a una temperatura de 45°C y se encuentra un tercio saturado con humedad. Del convertidor no sale oxígeno libre. Dos tercios del carbono pasan a CO y el resto a CO₂. El soplado dura 10,5 minutos.

PREGUNTAS

1. El peso total de la escoria
2. El volumen del aire a las condiciones dadas
3. El tiempo de duración de cada período de soplado
4. La composición de los gases en cada período

SOLUCION

$$\text{Escoria} = \text{FeO} + \text{SiO}_2 + \text{MnO}$$

$$\text{Arrabio} = 20 \times 2000 = 40000 \text{ libras}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 - 3,72 - 2,18 - 1,24 = 92,86\%$$

$$\text{C} = 40000 \times 0,0372 = 1488$$

$$\text{Si} = 40000 \times 0,0218 = 872$$

$$\text{Mn} = 40000 \times 0,0124 = 496$$

$$\text{Fe} = 40000 \times 0,9286 = 37144$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 40000 \times 0,048 = 1920$$

$$\text{FeO} = 1920 \times 72/56 = 2468,6$$

$$\text{SiO}_2 = 872 \times 60/28 = 1868,6$$

$$\text{MnO} = 496 \times 71/55 = 640,3$$

$$4977,5$$

$$\text{Peso total de la escoria} = 4977,5 \text{ libras (4-1)}$$

2

Vamos a utilizar la expresión:

$$\text{ft}^3 \text{ de aire} = \frac{\text{O}_2 \text{ total en aire}}{\text{O}_2 \text{ ft}^3 \text{ de aire}} \quad (1)$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 1488 \times 2/3 = 992 \text{ libras}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 1488 \times 1/3 = 496 \text{ libras}$$

$$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO} \quad \text{O} = 992 \times 16/12 = 1322,7 \text{ libras; O}_2 = 14838,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 \quad \text{O} = 496 \times 32/12 = 1322,7 \text{ libras; O}_2 = 14838,7 \text{ ft}^3$$

$$\text{O del Fe} = 2468,6 - 1920 = 548,6 \text{ libras; O}_2 = 6154,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{O del Si} = 1868,6 - 872 = 996,6 \text{ libras; O}_2 = 11180,6 \text{ ft}^3$$

$$\text{A del Mn} = 640,3 - 496 = 144,3 \text{ libras; O}_2 = 1618,9 \text{ ft}^3$$

$$\text{Total O del aire} = 4334,9 \text{ libras; O}_2 = 48631,5 \text{ ft}^3$$

Condiciones del aire

$$T = 45^\circ\text{C}$$

$$P \text{ barométrica} = 2,5 \times 760 = 1900 \text{ mm}$$

$$\text{Saturación del aire} = 1/3 \text{ con vapor de agua}$$

$$\text{Presión de saturación a } 45^\circ\text{C} = 71,9 \text{ mm}$$

$$\text{Presión real de H}_2\text{O} = 71,9 \times 1/3 = 23,97 \text{ mm}$$

$$\text{Presión de aire seco} = 1900 - 23,97 = 1876,03 \text{ mm}$$

Supongamos 1 ft³ de aire seco

$$\text{Volumen de H}_2\text{O por ft}^3 \text{ de aire seco} = 1 \times 23,97/1876,03 = 0,0128 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 1 + 0,0128 = 1,0128 \text{ ft}^3$$

Composición del aire humedo

$$\text{Aire seco} = 1,0000 \text{ ft}^3 = 98,74\%$$

$$\text{Humedad} = 0,0128 \text{ ft}^3 = 1,26\%$$

$$1,0128 \text{ ft}^3 = 100,00\%$$

Con esta composición, si introducimos al convertidor 1 ft³ de aire humedo, el H₂O se descompone en 1/2 O₂ + H₂ y el O₂ reacciona con las impurezas del arrabio para que no salga O₂ libre en los gases del convertidor, por tanto,

$$\text{O}_2/\text{ft}^3 \text{ de aire humedo} = 0,9874 \times 0,21 + 0,0126/2 = 0,214$$

$$\text{Volumen de aire humedo a C N} = 48631,5 / 0,214 = 227250 \text{ ft}^3$$

Cambio de condiciones.

$$V_1 = 227250 \text{ ft}^3$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 1900 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 45 + 273 = 318 \text{ K}$$

$$V_2 = V_1 \times (P_1/T_1) \times (T_2/P_2) = 105884 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen de aire húmedo a las condiciones dadas} = 105884 \text{ ft}^3 \quad (4-2)$$

3

Durante el primer periodo habrá oxidación del Si + Mn + algo de Fe

$$t_1 \text{ sin oxidación del Fe} = 10,5 \times (996,6 + 144,3)/4334,9 = 2,76 \text{ min}$$

Durante el segundo periodo habrá oxidación del C + algo de Fe.

$$t_2 \text{ sin oxidación del Fe} = 10,5 \times 1322,7 \times 2/4334,9 = \frac{6,41 \text{ min}}{9,17 \text{ min}}$$

$$\text{Tiempo de oxidación del Fe} = 10,5 \times 548,6/4334,9 = 1,33 \text{ min}$$

$$t_1 \text{ con oxidación de Fe} = 2,79 + 1,33 \times (2,76/9,17) = 3,16 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de soplado del 1º periodo} = 3,16 \text{ min. (4-3)}$$

$$t_2 \text{ con oxidación del Fe} = 6,41 + 1,33 \times (6,41/9,17) = 7,34 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de soplado del 2º periodo} = 7,34 \text{ min. (4-3)}$$

4

Primer periodo

En este periodo, los gases producidos son el N₂ proveniente del aire que oxida el Si + Mn y parte del Fe, así como el H₂ proveniente de la descomposición del H₂O

$$\text{O}_2 \text{ de este periodo} = 11180,6 + 1618,9 + 6154,6 \times 3,16/10,5 = 14651,74 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 14651,74/0,214 = 68466 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire seco} = 68466 \times 0,9874 = 67603 \text{ ft}^3$$

$$\text{Humedad} = 68466 \times 0,0126 = 863 \text{ ft}^3$$

Composición del gas durante el 1º periodo (4-4)

$$\text{N}_2 = 67603 \times 0,79 = 53406 \text{ ft}^3 = 98,41\%$$

$$\text{H}_2 = \frac{863 \text{ ft}^3}{54269 \text{ ft}^3} = \frac{1,59\%}{100,00\%}$$

Gases del 2º periodo = N₂ + H₂ + CO + CO₂

$$\text{O}_2 = 14838,7 \times 2 + 6154,6 \times 7,34/10,5 = 33980 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire húmedo} = 33980/0,214 = 158785 \text{ ft}^3$$

Composición del gas durante el 2º periodo (4-4)

$$\begin{aligned} N_2 &= 158785 \times 0.9874 \times 0.79 = 123860 \text{ ft}^3 = 72.69\% \\ H_2 &= 158785 \times 0.0126 = 2001 \text{ ft}^3 = 1.17\% \\ CO &= 14838.7 \times 2 = 29678 \text{ ft}^3 = 17.42\% \\ CO_2 &= 14838.7 \times 1 = 14839 \text{ ft}^3 = 8.71\% \\ &= 170378 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°5 (7)

En convertidor Bessemer - ácido sopla una carga de 20 toneladas métricas de un arrabio que contiene

$$\begin{aligned} C &= 3.6\% \\ Mn &= 0.7 \\ Si &= 1.2 \end{aligned}$$

Se oxida también hierro en una cantidad equivalente al 2.8% de arrabio. Dos tercios del C pasa a CO y un tercio a CO₂. Asumir que el hierro se oxida a una rata uniforme a través del soplado. El soplado tarda 13 minutos. Los gases salen del convertidor a 1500°C.

El calor de formación de la escoria es de 150 kcalorías por kilogramo de SiO₂.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire necesario para el soplado
2. El tiempo de duración de cada uno de los dos periodos.
3. El peso de la escoria y el volumen de los gases producidos
4. El calor generado por minuto en cada período
5. El calor neto dejado por minuto en cada periodo, después de deducir el calor sacado por los gases

SOLUCION

$$\begin{aligned} 1 \\ \text{Arrabio} &= 20000 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= 20000 \times 0.036 = 720 \\ Mn &= 20000 \times 0.007 = 140 \\ Si &= 20000 \times 0.012 = 240 \\ Fe &= 20000 \times 0.945 = 18900 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C \rightarrow CO &= 720 \times 2/3 = 480 \\ C \rightarrow CO_2 &= 720 - 480 = 240 \end{aligned}$$

$$Fe \rightarrow FeO = 20000 \times 0.028 = 560$$

$$\begin{aligned} O \text{ del } CO &= 480 \times 16/12 = 640 \text{ Kg} \\ O \text{ del } CO_2 &= 240 \times 32/12 = 640 \text{ Kg} \\ O \text{ del } Mn &= 140 \times 16/55 = 40.7 \text{ Kg} \\ O \text{ del } Si &= 240 \times 32/28 = 275 \text{ Kg} \\ O \text{ del } Fe &= 560 \times 16/56 = 160 \text{ Kg} \\ O \text{ total del aire} &= 1755.7 \text{ Kg.} = 1229 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Aire} = 1229 \times 0.71 = 872.6 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire necesario} = 872.6 \text{ m}^3 (5.1)$$

$$\begin{aligned} 2 \\ O \text{ del primer periodo sin el } O \text{ del } FeO &= 40.7 + 275 = 315.7 \text{ Kg} \\ O \text{ del segundo periodo sin el } O \text{ del } FeO &= 640 \times 2 = 1280 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$t_1 \text{ sin FeO} = 13 \times 315,7/1755,7 = 2,33 \text{ min}$$

$$t_2 \text{ sin FeO} = 13 \times 1280/1755,7 = \frac{9,48 \text{ min}}{1,81 \text{ min}}$$

$$t_{\text{FeO}} = 13 \times 160/1755,7 = 1,19 \text{ min}$$

$$t_1 \text{ con FeO} = 2,33 + 1,19 \times 2,33/1,81 = 2,6 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de soplado del primer periodo} = 2,6 \text{ min. (5-2)}$$

$$t_2 \text{ con FeO} = 9,48 + 1,19 \times 9,48/1,81 = 10,4 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de soplado del segundo periodo} = 10,4 \text{ min. (5-2)}$$

3

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{FeO}$$

$$\text{MnO} = 140 + 40,7 = 180,7 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 240 + 275 = 515,0 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO} = 560 + 160 = \underline{720,0 \text{ Kg}}$$

$$\text{Escoria} = 1415,7 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 1415,7 \text{ Kg. (5-3)}$$

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$$

$$\text{CO} = 480 + 640 = 1120 \text{ Kg.} = 896 \text{ m}$$

$$\text{CO}_2 = 240 + 640 = 880 \text{ Kg.} = 448 \text{ m}$$

$$\text{N}_2 = 5852 \times 0,79 = 4623 \text{ m}$$

$$\text{Gas} = 5967 \text{ m}$$

$$\text{Volumen del gas} = 5967 \text{ m}^3 \text{ (5-3)}$$

4

En la Tabla XI II del Apéndice se encuentran los calores de formación de los óxidos por kilogramo de elemento oxidado

Primer periodo

Calor de oxidación del

$$\text{Si} = 240 \times 7160 = 1'718'400 \text{ Kcal}$$

$$\text{Mn} = 140 \times 1757 = 245'980 \text{ Kcal}$$

$$\text{Fe} = 560 \times (2,33 + 11,81) \times 1151 = \underline{127'166 \text{ Kcal}}$$

$$\text{Total calor de oxidación} = 2'091'546 \text{ Kcal}$$

Suponiendo que los óxidos de Mn y Fe pasan a la escoria como silicatos, tendremos

$$\text{MnO} + \text{SiO}_2 = \text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{SiO}_2 = 180,7 \times 60/71 = 152,7 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO} = 720 \times 2,33/11,81 = 142 \text{ kg}$$

$$\text{FeO} + \text{SiO}_2 = \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{SiO}_2 = 142 \times 60,72 = 118,3 \text{ Kg}$$

Calores de formación de escoria

$$\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 = 152,7 \times 150 = 22905 \text{ Kcal}$$

$$\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 = 118,3 \times 150 = 17745 \text{ Kcal.}$$

$$40650 \text{ kcal}$$

$$\text{Calor generado durante el 1º periodo} = (2'091'546 + 40650) / 2,6 = 820075 \text{ kcal/min}$$

$$\text{Calor generado durante el 1º periodo} = 820075 \text{ Kcal./min. (5-4)}$$

Segundo periodo

$$\text{SiO}_2 \text{ restante para neutralizar el FeO de este periodo} = 515 - 152,7 - 118,3 = 244 \text{ Kg}$$

$$\text{Calor de formación del FeO} \cdot \text{SiO}_2 = 244 \times 150 = 36600 \text{ Kcal}$$

calor de oxidación cuando

$$\begin{aligned} \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 480 \times 2430 &= 1'166\,400 \text{ Kcal} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 240 \times 8100 &= 1'944\,000 \text{ Kcal} \\ \text{Fe} \rightarrow \text{FeO} &= 560 \times (9,48/11,81) \times 1151 &= \underline{517.934 \text{ Kcal}} \\ &&3'628.334 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor generado durante el 2º periodo} &= (3'628\,334 + 36600) \times 10,4 = 352\,398 \text{ Kcal/min} \\ \text{Calor generado durante el 2º periodo} &= 352398 \text{ Kcal/min (5-4)} \end{aligned}$$

El gas que sale durante el primer periodo es el N_2

$$\begin{aligned} \text{O del 1º periodo} &= 40,7 + 275 + 160 \times (2,33/11,81) = 347,3 \text{ Kg} \\ \text{N} &= 347,3 \times 76,8/23,2 = 1150 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Calor sacado por el N} = 1150 \times (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 462300 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor neto dejado durante el 1º periodo} &= (2'091\,546 + 40650 - 462300) / 2,6 \\ &= 642268 \text{ Kcal/min} \\ \text{Calor neto dejado durante el 1º periodo} &= 642268 \text{ Kcal/min. (5-5)} \end{aligned}$$

Durante el segundo periodo, los gases que salen son: N_2 , CO y CO_2

$$\begin{aligned} \text{O de este periodo} &= 1755,7 - 347,3 = 1408,4 \text{ Kg} \\ \text{N} &= 1408,4 \times (76,8/23,2) = 4662,2 \text{ Kg} \\ \text{N} + \text{CO} &= 4662,2 + 1120 = 5782,2 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Calor sacado del convertidor por

$$\begin{aligned} \text{N} + \text{CO} &= 5782,2 \times (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 2'333\,118 \text{ Kcal} \\ \text{CO}_2 &= 880 \times (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = \underline{361\,680 \text{ Kcal}} \\ &2'694\,798 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor neto dejado durante el 2º periodo} &= (3'628\,334 + 36600 - 2'694\,798) / 10,4 \\ &= 93282 \text{ Kcal/min} \\ \text{Calor neto dejado durante el 2º periodo} &= 93282 \text{ Kcal/min. (5-5)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°6 (7)

Un convertidor bessemer trata 30 toneladas de arrabio, recibiendo 680 metros cúbicos de aire por minuto. Las impurezas removidas del arrabio son 4‰C, 1,8‰Si, 1,6‰Mn. Tres cuartos del carbono pasan a CO y es resto a CO_2 . Hacia el final del soplo se han oxidado 900 kilogramos de hierro.

El calor específico del baño fundido es 0,20

Los gases salen del convertidor a 1500°C. Despreciar el calor en el soplo cuando entra al convertidor.

PREGUNTAS

1. El tiempo total de soplado
2. La rata promedio de calentamiento o enfriamiento del baño (grados centígrados por minuto) en cada periodo, asumiendo que la pérdida por radiación, convección y conducción es una cantidad constante e igual al 75% del calor total generado durante el primer periodo.

Calor generado por oxidacion de: (tabla XLII)

$$\text{Si} = 540 \times 7160 = 3'866.400 \text{ Kcal}$$

$$\text{Mn} = 480 \times 1757 = 843.360 \text{ Kcal}$$

$$\text{Fe} = 247.2 \times 1151 = 284.527 \text{ Kcal}$$
$$4'994.287 \text{ Kcal}$$

Calor generado en la formacion de escorias. Asumiendo 70 kilocalorias por kilogramo de MnO para la combinacion MnO y SiO₂ y 120 kilocalorias por kilogramo de FeO para la combinacion FeO y SiO₂. (7, pag. 132)

$$\text{MnO} = 480 + 139,6 = 619,6 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 540 + 617,4 = 1157,4 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO (1º)} = 317,7 \text{ Kg}$$

Calor generado al formarse

$$\text{MnO SiO}_2 = 619,6 \times 70 = 43372 \text{ Kcal}$$

$$\text{FeO SiO}_2 = 317,7 \times 120 = 38124 \text{ Kcal}$$
$$81496 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor generado el 1º periodo} = 4'994.287 + 81496 = 5'075.783 \text{ Kcal}$$

$$\text{Pérdidas de calor del 1º periodo} = 5'075.783 \times 0,25 = 1'268.946 \text{ Kcal}$$

Calor sacado por gases

$$\text{N} = 2739 \times (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 1'101.708 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor neto} = 5'075.783 - 1'268.946 - 1'101.708 = 2'705.129 \text{ Kcal}$$

Este calor implica un aumento de temperatura

$$Q = W C_m t$$

$$Q = \text{calor neto} = 2'705.129 \text{ Kcal}$$

$$W = \text{Peso del baño} = 30000 \text{ Kg}$$

$$C_m = \text{calor especifico del baño fundido} = 0,2$$

$$t = ^\circ\text{C}$$

$$t = 2'705.129 / 30000 \times 0,2 \times 4,06 = 111^\circ\text{C/min}$$

$$\text{Aumento de temperatura durante 1º periodo} = 111^\circ\text{C/min. (6.2)}$$

Segundo periodo

$$\text{CO} = 900 + 1200 = 2100 \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 = 300 + 800 = 1100 \text{ Kg}$$

$$\text{O (2º)} = 1200 + 800 + 652,8 \times (16/56) = 2186,5 \text{ Kg}$$

$$\text{N (2º)} = 2186,5 \times (76,8/23,2) = 7238 \text{ Kg}$$

Calores generados cuando

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 900 \times 2430 = 2'187.000 \text{ Kcal}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 300 \times 8100 = 2'430.000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 652,8 \times 1151 = 751.373 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor de oxidacion} = 5'368.373 \text{ Kcal}$$

$$\text{Por formacion FeO SiO}_2 = 893,3 \times 120 = 100.716 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor total generado} = 5'368.373 + 100.716 = 5'469.089 \text{ Kcal}$$

Calor en los gases al salir del convertidor

$$\begin{aligned} \text{CO} &= 2100 \cdot (0,242 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 847.350 \text{ Kcal} \\ \text{N}_2 &= 7238 \cdot (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 2'909.676 \text{ Kcal} \\ \text{CO}_2 &= 1100 \cdot (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 452.100 \text{ Kcal} \\ \text{Total calor sacado por gases} &= 4'209.126 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\text{Calor neto} = 5'469.089 - 4'209.126 = 1'259.963 \text{ Kcal}$$

$$\text{Cambio en el calor neto (2º) - (1º) = 1'259.963 - 2.705.129 = - 1'445.166 \text{ Kcal}$$

$$t = - 1'445.166 / 30000 \times 0,2 \times 10^{-3} = - 22,5$$

Disminución de temperatura durante el 2º periodo = 22,5°C/min. (6-2)

EJERCICIO N°7 (7)

Una carga de 10000 kilogramos de arrabio es tratada en un convertidor Bessemer, produciendo 527 kilogramos de escoria de la siguiente composición: 65,5%SiO₂, 13,5%MnO y 21,0%FeO. Los gases del convertidor totalizan 2760 metros cúbicos y contienen 6,0%CO, 18,1%CO₂ y 75,9%N₂.

PREGUNTAS

1. La composición del arrabio utilizado
2. El hierro puro producido después del soplado
3. Los metros cúbicos de aire requerido para el soplado completo
4. El tiempo relativo ocupado por cada uno de los dos periodos

SOLUCION

$$\text{Arrabio utilizado} = \text{Fe} + \text{Si} + \text{Mn} + \text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{SiO}_2 \text{ en escoria} &= 527 \times 0,655 = 345,185 \text{ Kg.} \\ \text{Si oxidado} &= 345,185 \times 28,60 = 161,1 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MnO en escoria} &= 527 \times 0,135 = 71,145 \text{ Kg} \\ \text{Mn oxidado} &= 71,145 \times 55/71 = 55,11 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ en gas} &= 2760 \times 0,06 = 165,60 \text{ m} \\ \text{C en este} &= 165,6 \times 12/22,4 = 88,7 \text{ Kg} \\ \text{CO en gas} &= 2760 \times 0,181 = 499,56 \text{ Kg} \\ \text{C en este} &= 499,56 \times 12/22,4 = 267,6 \text{ kg} \\ \text{C total oxidado} &= 88,7 + 267,6 = 356,3 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Composición del arrabio (7-1)

$$\begin{aligned} \text{Si} &= 100 \times (161,1/10000) = 1,61\% \\ \text{Mn} &= 100 \times (55,11/10000) = 0,55\% \\ \text{C} &= 100 \times (356,3/10000) = 3,56\% \\ \text{Fe} &= 100 - 1,61 - 0,55 - 3,56 = 94,28\% \end{aligned}$$

$$\text{FeO en escoria} = 527 \times 0,21 = 110,67 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe oxidado} = 110,67 \times 56,72 = 86,1 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe puro producido} = 9428 - 86 = 9342 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe puro producido} = 9342 \text{ Kg. (7-2)}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = \text{N}_2 \text{ del aire}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 2760 \times 0,759 = 2094,84 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 2094,84/0,79 = 2651,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire requerido} = 2651,7 \text{ m}^3 \text{ (7-3)}$$

$$\text{Elementos oxidados durante el 1º periodo} = \text{Si} + \text{Mn} + \text{algo de Fe}$$

$$\text{O del SiO}_2 = 345,2 - 161,1 = 184,1 \text{ Kg}$$

$$\text{O del MnO} = 71,15 - 55,11 = 16,04 \text{ Kg}$$

$$\text{O del 1º periodo sin O del FeO} = 184,1 + 16,04 = 200,14 \text{ Kg.}$$

$$\text{Elementos oxidados durante el 2º periodo} = \text{C (a CO)} + \text{C (a CO}_2\text{)} + \text{algo de Fe}$$

$$\text{O del CO} = 500 \times \frac{1}{2} = 250 \text{ m}^3 = 357 \text{ Kg}$$

$$\text{O del CO}_2 = 165,6 \times \frac{32}{22,4} = 236,6 \text{ Kg}$$

$$\text{O del 2º periodo sin O del FeO} = 357 + 236,6 = 593,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Relación de tiempos} = t_1/t_2 = 200,14/593,6 = 0,337$$

$$\text{Relación de tiempos} = t_1: t_2 = 0,337:1 \text{ (7-4)}$$

EJERCICIO N°8 (7)

Un convertidor Bessemer sopla una carga de arrabio a acero en 11 minutos. 1% del peso en el arrabio es oxidado y escorificado. El peso de la escoria producida fue de 4200 libras, consistiendo de 70%SiO₂, 20%MnO y 10%FeO. Además del Si y el Mn, el arrabio contiene 4 2% de C. Los cuartos del carbono se oxidan a CO y el resto a CO₂.

Asumir que el Fe se oxida a una tasa uniforme

PREGUNTAS

1. El peso del arrabio cargado
2. El volumen de aire suministrado por minuto, en pies cúbicos
3. El tiempo de duración de cada periodo

SOLUCION

$$\text{Arrabio} = \text{Fe} + \text{Si} + \text{Mn} + \text{C}$$

$$\text{Si en escoria} = 4200 \times 0,7 = 2940 \text{ libras}$$

$$\text{Si del arrabio} = 2940 \times 28,60 = 1372$$

$$\text{Mn en escoria} = 4200 \times 0,2 = 840 \text{ libras}$$

$$\text{Mn del arrabio} = 840 \times 55/71 = 651$$

$$\text{FeO en escoria} = 4200 \times 0,1 = 420 \text{ libras}$$

$$\text{Fe de este} = 420 \times 56,72 = 237$$

$$\text{Fe del arrabio} = 237 + 0 = 237 \text{ (7-5)}$$

$$95.8\% \text{ del arrabio} = 32700 + 651 + 1372 = 34723 \text{ libras}$$

$$\text{Arrabio} = 34723/0.958 = 36245 \text{ libras}$$

$$\text{Peso del arrabio cargado} = 36245 \text{ libras (8-1)}$$

$$\begin{aligned} &2 \\ \text{C del arrabio} &= 36245 \times 0.042 = 1522.29 \text{ libras} \end{aligned}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 1522.29 \times \frac{3}{4} = 1141.72$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 1522.29 - 1141.72 = 380.57$$

$$\text{O del CO} = 1141.72 \times \frac{16}{12} = 1522.29 \text{ lbs}$$

$$\text{O del CO}_2 = 380.57 \times \frac{32}{12} = 1014.85 \text{ lbs.}$$

$$\text{O del SiO}_2 = 2940 - 1372 = 1568 \text{ lbs}$$

$$\text{O del MnO} = 840 - 651 = 189 \text{ lbs}$$

$$\text{O del FeO} = 420 - 327 = 93 \text{ lbs}$$

$$\text{O total} = 1522 + 1015 + 1568 + 189 + 93 = 4387 \text{ lbs.} = 49217 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire total} = 49217/0.21 = 234367 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 234367/11 = 21306 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\text{Aire suministrado} = 21306 \text{ ft}^3/\text{min. (8-2)}$$

$$\begin{aligned} &3 \\ \text{O del primer periodo, sin el del FeO} &= 1568 + 189 = 1757 \text{ lbs} \\ t_1 \text{ sin FeO} &= 11 \times 1757/4387 = 4.4 \text{ min} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O del segundo periodo, sin el del FeO} &= 1522 + 1015 = 2537 \text{ lbs} \\ t_2 \text{ sin FeO} &= 11 \times 2537/4387 = 6.36 \text{ min} \end{aligned}$$

$$t_1 + t_2 \text{ sin FeO} = 4.4 + 6.36 = 10.76 \text{ min}$$

$$t_{\text{FeO}} = 11 \times 93/4387 = 0.23 \text{ min}$$

$$t_1 \text{ total} = 4.4 + 0.23 \times 4.4/10.76 = 4.5 \text{ min}$$

$$\text{Duración del primer periodo} = 4.5 \text{ min. (8-3)}$$

$$t_2 \text{ total} = 6.36 + 0.23 \times 6.36/10.76 = 6.5 \text{ min}$$

$$\text{Duración del segundo periodo} = 6.5 \text{ min. (8-3)}$$

EJERCICIO N°9 (7)

Un artículo menciona los siguientes análisis para la operación de un convertidor que trata un arrabio bajo en silicio y alto en manganeso, por el proceso Bessemer Sueco, el soplado fue suspendido para retener carbono y manganeso en el acero

La carga es de 20 toneladas métricas y el peso de acero fue 18400 kilogramos

No se adiciona ningún fundente pero hay corrosión del revestimiento del convertidor. El revestimiento no contiene manganeso

		ACERO EL FINAL DEL SOPLO (%)		ESCORIA (%)	
		C	0.74	SiO ₂	47.25
Mn	0.28	Mn	0.25	MnO	3.80
Si	0.05	Si	0.04	FeO	9.45
P	0.02			Al ₂ O ₃	4.22
Fe	91.69			MgO	0.10
				CaO	0.88
				P ₂ O ₅	-

PREGUNTAS

1. El porcentaje removido de cada una de las impurezas
2. ¿Cual hubiera sido el peso y la composición de la escoria si no hubiera ocurrido la corrosión del revestimiento?
3. La composición del revestimiento

SOLUCION

1
Arrabio = 20000 Kg

C en arrabio = $20000 \times 0.0436 = 872$ Kg
C en acero = $18400 \times 0.0074 = 136.16$ Kg
C removido = $872 - 136.16 = 735.84$ Kg

Mn en arrabio = $20000 \times 0.0298 = 596$ Kg
Mn en acero = $18400 \times 0.0025 = 46$ Kg
Mn removido = $596 - 46 = 550$ Kg

Si en arrabio = $20000 \times 0.0095 = 190$ Kg
Si en acero = $18400 \times 0.0004 = 7.36$ Kg
Si removido = $190 - 7.36 = 182.64$ Kg

Impurezas removidas

C = $735.84 / 872 = 0.844$

C removido = 84.4% (9-1)

Mn = $550 / 596 = 0.923$

Mn removido = 92.3% (9-1)

Si = $182.64 / 190 = 0.962$

Si removido = 96.2% (9-1)

P removido = 0% (9-1)

2
Escoria sin corrosión del revestimiento = $SiO_2 + MnO + FeO$

El P del arrabio pasa todo al acero
P del arrabio = $20000 \times 0.0002 = 4$ Kg

Fe del arrabio = $20000 \times 0.9169 = 18338$ Kg
Fe en acero = $18400 - 136.16 - 46 - 7.26 - 4 = 18206.48$ Kg
Fe removido = $18338 - 18206.48 = 131.52$ Kg
FeO a escoria = $131.52 \times 72.56 = 169.1$ Kg

Peso y composición de la escoria sin corrosión del revestimiento (9-2)

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 &= 182,64 \times 68,28 = 391 \text{ Kg} & 30,8\% \\
 \text{MnO} &= 550 \times 71/55 = 710 \text{ Kg} & 55,9\% \\
 \text{FeO} &= 169 \text{ Kg} & 13,3\% \\
 &= 1270 \text{ Kg.} & 100,0\%
 \end{aligned}$$

MnO en escoria sin corrosión del revestimiento = MnO en escoria con corrosión del revestimiento

$$\text{Escoria con revestimiento corroído} = \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO}$$

$$\text{Escoria con corrosión del revestimiento} = 710/0,378 = 1878,3 \text{ Kg}$$

$$\text{Revestimiento corroído} = 1878,3 - 1270 = 608,3 \text{ Kg}$$

Distribución de la escoria con revestimiento corroído en sus componentes

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 &= 1878,3 \times 0,4725 = 887,5 \text{ Kg} \\
 \text{MnO} &= \text{ " } \times 0,3780 = 710,0 \text{ Kg} \\
 \text{FeO} &= \text{ " } \times 0,0945 = 177,5 \text{ Kg} \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 &= \text{ " } \times 0,0422 = 79,3 \text{ Kg} \\
 \text{MgO} &= \text{ " } \times 0,0140 = 7,5 \text{ Kg} \\
 \text{CaO} &= \text{ " } \times 0,0088 = 16,5 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

Composición del revestimiento: (9-3)

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 &= 887,5 - 391 = 496,5 \text{ Kg.} = 81,62\% \\
 \text{FeO} &= 177,5 - 169 = 8,5 \text{ Kg} = 1,40\% \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 &= 79,3 \text{ Kg.} = 13,04\% \\
 \text{MgO} &= 7,5 \text{ Kg.} = 1,23\% \\
 \text{CaO} &= 16,5 \text{ Kg.} = 2,71\% \\
 &= 608,3 \text{ Kg.} = 100,0\%
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°10 (7)

Un convertidor experimental Bessemer sopla un arrabio que contiene 93%Fe, 4%Si y 3%Mn. La carga es de 22 toneladas. Un cuarto del carbono se quema hasta CO, y los tres cuartos restantes lo hacen a CO. Hierro en cantidad equivalente a 5% de la carga se oxida a una rata uniforme.

En el caso (a) el convertidor es soplado con aire ordinario, en el caso (b) con aire enriquecido con 30% de O₂.

La temperatura promedio del baño es de 1500°C

PREGUNTAS

1. ¿Si en el caso (a) se sopla tarda 5 minutos, ¿cuanto tardara en el caso (b) haciendo las máquinas de soplado el mismo número de revoluciones por minuto?

2. Calcular en ambos casos el exceso de calor generado respecto del calor sacado por los gases, en cada período.

SOLUCION

En igualdad de otras condiciones, el tiempo de soplado es inversamente proporcional al contenido de oxígeno que tenga el aire, es decir, cuanto más enriquecido esté este en oxígeno, menor deberá ser el tiempo de soplado

Matemáticamente podemos establecer la siguiente relación:

$$t_a \cdot O_a = t_b \cdot O_b$$

Los subíndices "a" se refieren al tiempo y al contenido de oxígeno para el caso (a), y los subíndices "b", a los del caso (b)

$$t_a = 15 \text{ min.} \quad T_b = ?$$

$$O_a = 21\% \quad O_b = 30\%$$

$$t_b \times (O_a/O_b) = 15 \times (21/30) = 10,5 \text{ min}$$

Tiempo de soplado con aire enriquecido = 10,5 min. (10-1)

2
caso (a)

Debemos calcular el tiempo que tarda cada periodo, procediendo de la siguiente manera

$$\text{Carga} = 22000 \text{ Kg}$$

Distribución del arrabio

$$\text{Fe} = 22000 \times 0,93 = 20460 \text{ Kg}$$

$$\text{C} = 22000 \times 0,04 = 880$$

$$\text{Si} = 22000 \times 0,02 = 440$$

$$\text{Mn} = 22000 \times 0,01 = 220$$

Cálculo del oxígeno necesario para oxidar los elementos

$$\text{O para Si} = 440 \times 32/28 = 502,9 \text{ Kg}$$

$$\text{O para Mn} = 220 \times 16/55 = 64$$

$$\text{O oxidado} = 22000 \times 0,05 = 1100$$

$$\text{O para Fe} = 1100 \times 16/56 = 314,3$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 880 \times 3/4 = 660$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 880 \times 1/4 = 220$$

$$\text{O del CO} = 660 \times 16/12 = 880$$

$$\text{O del CO}_2 = 220 \times 32/12 = 586,7$$

$$\text{O total} = 502,9 + 64 + 314,3 + 880 + 586,7 = 2347,9 \text{ Kg}$$

$$2347,9/15 = 156,5 \text{ Kg./min}$$

$$\text{sin oxidación del Fe} = (502,9 + 64)/156,5 = 3,62 \text{ min}$$

$$\text{sin oxidación del Fe} = (880 + 586,7)/156,5 = \frac{9,37 \text{ min}}{2,99 \text{ min}}$$

$$\text{Fe} = 314,3/156,5 = 2,01 \text{ min}$$

$$t_1 \text{ total} = 3,62 + 2,01 \times (3,62/12,99) = 4,18 \text{ min}$$

$$t_2 \text{ total} = 9,37 + 2,01 \times (9,37/12,99) = 10,82 \text{ min}$$

$$15,00 \text{ min.}$$

Calor generado en el primer periodo por oxidacion de (ver datos en Tabla XLII)

$$\begin{aligned} \text{Si} &= 440 \times 7160 &= 3'150.400 \text{ Kcal} \\ \text{Mn} &= 220 \times 1757 &= 386.540 \\ \text{Fe} &= 1100 \times (3,62/12,99) \times 1151 &= 352.832 \\ \text{Total calor de oxidacion} &&= 3'889.772 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Escoria formada durante el primer periodo:

$$\begin{aligned} \text{MnO} &= 220 + 64 = 284 \text{ Kg} \\ \text{SiO}_2 &= 440 + 502,9 = 942,9 \\ \text{FeO} &= 1100 \times (3,62/12,99) \times (72/56) = 394,1 \end{aligned}$$

Asumiendo 70 Kcal por kilogramo de MnO, el calor para la combinación entre el MnO y el SiO₂, y 120 Kcal/Kg de FeO para la combinación entre el FeO y el SiO₂, obtendremos el calor para la formación de la escoria en este periodo

$$\begin{aligned} \text{MnO.SiO}_2 &= 284 \times 70 &= 19880 \text{ Kcal} \\ \text{FeO.SiO}_2 &= 394,1 \times 120 &= 47292 \text{ Kcal} \\ \text{Calor de formación de la escoria} &= 67172 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\text{Calor total generado} = 3'889.772 + 67172 = 3'956.944 \text{ Kcal}$$

$$\text{Gas producido} = N = [502,9 + 64 + 314,3 \times (3,62/12,99)] \times 76,8/23,2 = 2166,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Calor sacado por N} = 2166,6 \times (0,241 + 1,8 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 870973 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor} = 3'956.944 - 870.973 = 3.085.971 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor (primer periodo), caso (a)} = 3'085.971 \text{ Kcal. (10-2)}$$

Segundo periodo (a)

Calor generado por la oxidación de:

$$\begin{aligned} \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 660 \times 2430 &= 1.603.800 \text{ Kcal} \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 220 \times 8100 &= 1.782.000 \\ \text{Fe} &= 1100 \times (9,37/12,99) \times 1151 &= 913.268 \\ \text{Calor total de oxidacion} &&= 4'299.068 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Formación de escoria (FeO SiO₂)

$$\text{FeO} = 1100 \times (9,37/12,99) \times (72/56) = 1020 \text{ Kg}$$

$$\text{Calor de formación de escoria} = 1020 \times 120 = 122400 \text{ Kcal}$$

$$\text{Total calor generado (2º periodo), caso (a)} = 4'299.068 + 122400 = 4.421.468 \text{ Kcal}$$

$$\text{O total de este periodo} = 880 + 586,7 + 1100 \times (9,37/12,99) \times (16/56) = 1693,4 \text{ Kg}$$

Gases de este periodo.

$$N = 1693,4 \times 76,8/23,2 = 5605,7 \text{ Kg}$$

$$\text{CO} = 660 + 880 = 1540 \text{ Kg}$$

$$\text{CO}_2 = 220 + 586,7 = 806,7 \text{ Kg}$$

Calor sacado en los gases

$$\text{CO} = 806.7 \times (0.205 + 4.6 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 621.390 \text{ Kcal}$$

$$\text{N}_2 = 56.87 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 2'253.491$$

$$\text{CO}_2 = 806.7 \times (0.205 + 4.6 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 331.554$$

$$\text{Calor total sacado por los gases} = 3'206.435 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor} = 4'421.468 - 3'206.435 = 1'215.033 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor (segundo periodo), caso (a)} = 1'215.033 \text{ Kcal. (10-2)}$$

caso (b)

Aire enriquecido el 30% de O_2

El cálculo y los resultados son similares a los del caso (a), hasta la determinación del N_2

Primer periodo

$$\text{O}_2 \text{ total} = [502.9 + 64 + 314.3 \times (3.62/12.99)] \times 22.4/32 = 458.14 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 458.14 \times 70/30 = 1069 \text{ m}^3$$

$$\text{Calor sacado por } \text{N}_2 = 1069 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 537.173 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor} = 3'956.944 - 537.173 = 3'419.771 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor (primer periodo), caso (b)} = 3'419.771 \text{ Kcal. (10-2)}$$

Segundo periodo

$$\text{O}_2 \text{ total} = 1693.4 \times 22.4/32 = 1185.38 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 = 1185.38 \times 70/30 = 2766 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 1540 \times 22.4/28 + 2766 = 3998 \text{ m}^3$$

Calor sacado en los gases de este periodo

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 3998 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 2'008.995 \text{ Kcal}$$

$$\text{CO}_2 = 331.554$$

$$\text{Total calor sacado por los gases} = 2'340.549 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor} = 4'421.468 - 2'340.549 = 2'080.919 \text{ Kcal}$$

$$\text{Exceso de calor (segundo periodo), caso (b)} = 2'080.919 \text{ Kcal. (10-2)}$$

EJERCICIO N°11 (7)

Un convertidor Bessemer, revestido con materia básica, es cargado con 20 toneladas de arrabio de la siguiente composición

Fe	91.2%	Si	1.7%
C	3.6	Mn	1.1
P	2.4		

El soplo oxida todo el C, Si, Mn y P, y también Fe en una cantidad equivalente al 5.6% del peso del arrabio. Asumir que el Fe es oxidado a una rata uniforme durante el soplo.

Se agrega suficiente CaO como para producir una escoria con 35%CaO. Dos tercios del carbono oxidado pasan a CO y un tercio lo hace a CO_2 . Las máquinas de soplado proporcionan 580 metros cúbicos de aire por minuto.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire necesario para el soplado de la carga

- 2 La duración de cada periodo del soplo
- 3 El peso del CaO que debe adicionarse, y la composición de la escoria.

SOLUCION

1

Cuando el arrabio es rico en P su tratamiento se hace por el proceso Thomas, básico, o Bessemer básico en el cual se adiciona al convertidor CaO como fundente (7), formándose una escoria fuertemente básica la cual extrae el P como fosfato cálcico. La oxidación del P tiene lugar en un *tercer periodo* después de la remoción de C, puesto que a temperaturas elevadas el P se oxida menos rápidamente que el C. En el proceso bessemer básico se puede asumir que algo del Fe (más o menos 1/3) se oxida en el segundo periodo y el resto en el tercero, o se asume que el Fe se oxida como en el proceso ácido, a una rata uniforme durante el proceso.

$$\text{Arrabio} = 20000 \text{ Kg.}$$

$$\text{C en arrabio} = 20000 \times 0.036 = 720$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 720 \times 2/3 = 480$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 720 - 480 = 240$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 20000 \times 0.056 = 1120$$

$$\text{Si en arrabio} = 20000 \times 0.017 = 340$$

$$\text{Mn en arrabio} = 20000 \times 0.011 = 220$$

$$\text{P en arrabio} = 20000 \times 0.024 = 480$$

$$\text{O del CO} = 480 \times 16/12 = 640 \text{ Kg}$$

$$\text{O del CO}_2 = 240 \times 32/12 = 640$$

$$\text{O del FeO} = 1120 \times 16/56 = 320$$

$$\text{O del Si} = 340 \times 32/28 = 388.6$$

$$\text{O del Mn} = 220 \times 16/55 = 64$$

$$\text{O del P} = 480 \times 80/62 = 620$$

$$\text{O total} = 2672.6 \text{ Kg.} = 1870.82 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1870.82/0.21 = 8909 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire necesario para el soplado de la carga} = 8909 \text{ m}^3 \text{ (11-1)}$$

2

$$\text{O}_2 \text{ soplado} = 580 \times 0.21 = 121.8 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{O soplado} = 121.8 \times 32/22.4 = 174 \text{ Kg./min}$$

Durante el primer periodo (tiempo = t_1), habrá oxidación de Si, Mn y algo de Fe

Durante el segundo periodo (tiempo = t_2), habrá oxidación de C y algo de Fe

Durante el tercer periodo (tiempo = t_3), habrá oxidación del P y algo de Fe

$$t_1 \text{ sin oxidación de Fe} = (388.6 + 64)/174 = 2.60 \text{ min}$$

$$t_2 \text{ sin oxidación de Fe} = 640 \times 2 / 174 = 7.36 \text{ min}$$

$$t_3 \text{ sin oxidación de Fe} = 620 / 174 = 3.56 \text{ min}$$

$$13.52 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de oxidación del Fe } (t_{\text{Fe}} = t_{\text{FeO}}) = 320/174 = 1.85 \text{ min}$$

Tiempo total de duración de cada periodo: (11-2)

$$t = 2.60 + 1.85 \times (2.60/13.52) = 2.96 \text{ min}$$

$$t_2 = 7.36 + 1.85 \times (7.36/13.52) = 8.37 \text{ min}$$

$$t_3 = 3.56 + 1.85 \times (3.56/13.52) = 4.04 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo total del soplado} = 15.37 \text{ min}$$

Tiempo de duración de cada periodo: (11-1)

Primer periodo = 2,96 min

Segundo periodo = 8,37 min

Tercer periodo = 4,04 min

$$\text{Escoria} = \text{FeO} + \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{CaO}$$

$$\text{FeO} = 1 \cdot 20 + 320 = 1440 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 340 + 388,6 = 728,6$$

$$\text{MnO} = 220 + 64 = 284$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 480 + 620 = 1100$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 3552,6 \text{ Kg.} = 65\%$$

$$\text{CaO} = 3552,6 \times (35,65) = 1913 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del CaO a adicionar} = 1913 \text{ Kg. (11-3)}$$

Composición de la escoria: (11-3)

$$\text{FeO} = 1440,0 \text{ Kg.} = 26,35\%$$

$$\text{SiO}_2 = 728,6 \text{ Kg.} = 13,33\%$$

$$\text{MnO} = 284,0 \text{ Kg.} = 5,20\%$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 1100,0 \text{ Kg.} = 20,12\%$$

$$\text{CaO} = 1913,0 \text{ Kg.} = 35,00\%$$

$$\text{Total escoria} = 5465,6 \text{ Kg.} = 100,00\%$$

EJERCICIO N°12 (7)

Un convertidor Bessemer fue cargado con 10000 kilogramos de arrabio y se le suministraron 203 metros cúbicos de soplo por minuto por 18 minutos, produciéndose 1200 kilogramos de una escoria que contenía 15% SiO₂, 5,9% MnO, 47,3% P₂O₅, 24,0% FeO y 7,8% CaO. Un cuarto del carbono pasa a CO₂ y tres cuartos a CO.

Después del soplado, se adicionan 50 kilogramos de ferromanganeso como desoxidante y recarburizador (15% Fe, 80% Mn, 5% C). Asumir que la mitad del manganeso del ferromanganeso se pierde por oxidación.

PREGUNTAS

1. La composición del hierro utilizado.

2. El volumen y composición promedio de los gases producidos después del soplado

completo

3. El tiempo de cada periodo de soplado

4. El porcentaje de acero producido al final del soplo

SOLUCION

$$\text{Hierro (arrabio) utilizado} = \text{Fe} + \text{Mn} + \text{P} + \text{Si} + \text{C}$$

$$\text{Escoria} = 1200 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 1200 \times 0,15 = 180 \text{ Kg.}$$

$$\text{MnO} = 1200 \times 0,059 = 70,8 \text{ Kg.}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 1200 \times 0,473 = 567,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{Si} = 180 \times 28/60 = 84 \text{ Kg.}$$

$$\text{Mn} = 70,8 \times 55/71 = 54,8 \text{ Kg}$$

$$\text{P} = 567,6 \times 32/142 = 247,6 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned}\text{FeO} &= 1200 \times 0,24 = 288 \text{ Kg.} & \text{Fe} &= 288 \times 56/72 = 224 \text{ Kg} \\ \text{CaO} &= 1200 \times 0,078 = 93,6 \text{ Kg} \\ \text{Aire total} &= 203 \times 18 = 3654 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{O}_2 \text{ total soplado} = 203 \times 0,21 \times 18 = 767,34 \text{ m}^3$$

Oxígeno en la escoria

$$\begin{aligned}\text{O}_2 \text{ del SiO}_2 &= 180 - 84 = 96 \text{ Kg.} & &= 67,2 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del MnO} &= 70,8 - 54,8 = 16 \text{ Kg.} & &= 11,2 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del P}_2\text{O}_5 &= 567,6 - 247,6 = 320 \text{ Kg.} & &= 224,0 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del FeO} &= 288 - 224 = 64 \text{ Kg.} & &= 44,8 \text{ m}^3 \\ \text{Total O}_2 \text{ de oxidación} & & &= 347,2 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{O}_2 \text{ para CO y CO}_2 = 767,34 - 347,2 = 420,14 \text{ m}^3$$

Sea X peso del C



$$\begin{aligned}\text{O}_2 \text{ del CO} &= \frac{1}{4} X \cdot (0,5 \times 22,4/12) = 0,70X \\ \text{O}_2 \text{ del CO}_2 &= \frac{1}{4} X \cdot (22,4/12) = 0,47X \\ \text{O}_2 \text{ total del C} & & &= 1,17X\end{aligned}$$

$$1,17X = 420,14$$

$$X = \text{peso del C} = 420,14/1,17 = 359 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 10000 - 84 - 54,8 - 247,6 - 359 = 9254,6 \text{ Kg}$$

Composición del hierro o arrabio: (12-1)

$$\begin{aligned}\text{Fe} &= 9254,6 \text{ Kg.} = 92,54\% \\ \text{Mn} &= 54,8 \text{ Kg.} = 0,59\% \\ \text{P} &= 247,6 \text{ Kg.} = 2,68\% \\ \text{Si} &= 84,0 \text{ Kg.} = 0,84\% \\ \text{C} &= 359,0 \text{ Kg.} = 3,89\% \\ & & &100,00\%\end{aligned}$$

$$\text{Gas} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 359 \times \frac{1}{4} = 269 \text{ Kg}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 359 - 269 = 90 \text{ Kg}$$

Volumen y composición promedio del gas (12-2)

$$\begin{aligned}\text{CO} &= 269 \times 22,4/12 = 502 \text{ m}^3 = 14,1\% \\ \text{CO}_2 &= 90 \times 22,4/12 = 168 \text{ m}^3 = 4,7\% \\ \text{N}_2 &= 3654 \times 0,79 = 2887 \text{ m}^3 = 81,2\% \\ \text{Total gas} &= 3557 \text{ m}^3 = 100,0\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O}_2 \text{ del 1º período sin O}_2 \text{ del Fe} &= 67,2 + 11,2 = 78,4 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del 2º} &= & &= 1,17 \times 359 = 420,0 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del 3º} &= & &= 224,0 \text{ m}^3 \\ \text{O}_2 \text{ del Fe} &= & &= 44,8 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{O}_2 \text{ del soplado} = 203 \times 0,21 = 42,63 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$t_1 \text{ sin FeO} = 78,4 / 42,63 = 1,84 \text{ min}$$

$$t_2 \text{ sin FeO} = 9,85 / 42,63 = 0,23 \text{ min}$$

$$t_3 \text{ sin FeO} = 5,25 / 42,63 = 0,12 \text{ min}$$

$$16,94 \text{ min}$$

$$t_{Fe} = 44,8 / 42,63 = 1,05 \text{ min}$$

Tiempo total de cada período: (12-3)

$$t_1 = 1,84 + 1,05 \times (1,84/16,94) = 1,95 \text{ min}$$

$$t_2 = 0,23 + 1,05 \times (0,23/16,94) = 0,24 \text{ min}$$

$$t_3 = 0,12 + 1,05 \times (0,12/16,94) = 0,13 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo total} = 1,95 + 0,24 + 0,13 = 2,32 \text{ min}$$

4

Acero = Fe + Mn + C

$$\text{Fe del arrabio} = 10000 \times 0,9254 = 9254 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe del FeO} = 224 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe del Fe-Mn} = 50 \times 0,15 = 7,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe del acero} = 9254 + 224 + 7,5 = 9037,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Mn del acero} = 20 \text{ Kg}$$

$$\text{C del acero} = 50 \times 0,05 = 2,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del acero} = 9037,5 + 20 + 2,5 = 9060 \text{ Kg}$$

$$\text{Acero} = 9060 / 10000 = 0,906$$

Acero = 90,6% del arrabio (12-4)

EJERCICIO N°13 (7)

Un convertidor Bessemer básico es cargado con 20 toneladas métricas de arrabio junto con CaO como fundente y es soplado hasta que tiene 17 toneladas de Fe y 5720 kilogramos de escoria que contiene: 13%SiO₂, 5%MnO, 19%P₂O₅, 27%FeO y 36%CaO

Asumir que el Fe se oxida a una rata uniforme durante el soplado. Dos tercios del carbono pasan a CO y un tercio a CO₂

El tiempo total de soplado es de 28 minutos. Asumir que el calor de formación de la escoria es de 150 kilocalorías por kilogramo de SiO₂ durante el primer periodo y 700 kilocalorías por kilogramo de CaO durante el tercer periodo

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire requerido para el soplado
2. El tiempo utilizado en cada periodo
3. El calor generado por minuto durante cada periodo

SOLUCION

1

El aire es utilizado para la oxidación de las impurezas, por eso el O de los elementos reducidos de la escoria + el O del CO y del CO₂, será el O del aire

$$\text{SiO}_2 = 5720 \times 0,13 = 743,6 \text{ Kg} \quad \text{O} = 743,6 \times 32/60 = 396,6 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO} = 5720 \times 0,05 = 286,0 \text{ Kg} \quad \text{O} = 286,0 \times 16/71 = 65,5 \text{ Kg}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 5720 \times 0,19 = 1086,8 \text{ Kg} \quad \text{O} = 1086,8 \times 80/142 = 612,3 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO} = 5720 \times 0,27 = 1544,4 \text{ Kg} \quad \text{O} = 1544,4 \times 16/72 = 343,2 \text{ Kg}$$

$$\text{Total O del aire en la escoria} = 1416,4 \text{ Kg}$$

Arrabio oxidado

$$\begin{aligned}
 \text{Si} &= 743,6 - 396,6 &= 347,0 \text{ Kg} \\
 \text{Mn} &= 286 - 64,5 &= 221,5 \text{ Kg} \\
 \text{P} &= 1086,8 - 612,3 &= 474,5 \text{ Kg} \\
 \text{Fe (FeO)} &= 1544,4 - 343,2 &= \underline{1201,2 \text{ Kg}} \\
 &&2244,2 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

Cálculo del C oxidado

$$\text{C del arrabio} = 20000 - 17000 - 2244,2 = 755,8 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 755,8 \times \frac{7}{3} = 503,9 \text{ Kg} & \text{O} &= 503,9 \times 16,12 = 671,9 \text{ Kg} \\
 \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 755,8 \times \frac{8}{2} = 252,0 \text{ Kg} & \text{O} &= 252,0 \times 32,12 = 671,8 \text{ Kg} \\
 && \text{Total O del C} &= 1343,7 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\text{O total de oxidación} = 1343,7 + 1416,6 = 2760,3 \text{ Kg} = 1932,21 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1932,21 \times 0,21 = 9201 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire requerido para el soplado} = 9201 \text{ m}^3 \text{ (13-1)}$$

El Fe se oxida a rata uniforme.

Durante el primer periodo (desulfuración) hay oxidación de Si, Mn y algo de Fe

Durante el segundo periodo (descarburación), hay oxidación del C y algo de Fe

Durante el tercer periodo (desfosforación), hay oxidación del P y algo de Fe

$$\begin{aligned}
 \text{O (1º) sin O del Fe} &= 396,6 + 64,5 = 461,1 \text{ Kg} \\
 \text{O (2º) sin O del Fe} &= 671,9 + 671,8 = 1343,7 \text{ Kg} \\
 \text{O (3º) sin O del Fe} &= \underline{612,3 \text{ Kg}} \\
 &2417,1 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{O del FeO} &= \underline{343,2 \text{ Kg}} \\
 &2760,3 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_1 \text{ sin FeO} &= 28 \times 461,1 / 2760,3 = 4,68 \text{ min} \\
 t_2 \text{ sin FeO} &= 28 \times 1343,7 / 2760,3 = 13,63 \text{ min} \\
 t_3 \text{ sin FeO} &= 28 \times 612,3 / 2760,3 = \underline{6,21 \text{ min}} \\
 &24,52 \text{ min} \\
 t_{\text{FeO}} &= 28 \times 343,2 / 2760,3 = 3,48 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Tiempo total de cada periodo (13-2)

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 4,68 + 3,48 \times (4,68 / 24,52) = 5,34 \text{ min} \\
 t_2 &= 13,63 + 3,48 \times (13,63 / 24,52) = 15,56 \text{ min} \\
 t_3 &= 6,21 + 3,48 \times (6,21 / 24,52) = \underline{7,09 \text{ min}} \\
 &27,99 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Este valor se refiere al calor producido en cada uno de los periodos al oxidarse las impurezas correspondientes

Calores de formación de óxidos (kilocalorias por kilogramo de metal)

SiO ₂	7160	MnO	1757
FeO	1151	CO	2430
CO ₂	8100	P ₂ O ₅	5912

Primer periodo (kilocalorias)

$$\begin{aligned} \text{Si} &= 147 \times 7160 &= 2'484\,520 \\ \text{Mn} &= 221.5 \times 1757 &= 389\,176 \\ \text{Fe} &= 1201.2 \times (4.68/24.52) \times 1151 &= 263\,886 \\ &&3'137\,582 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\text{Calor de formación de escoria} = 150 \times 743.6 = 111.540 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor generado durante el 1º periodo} &= (3'137\,582 + 111\,540) \times 5.34 = 608450 \text{ Kcal/min} \\ \text{Calor generado durante el 1º periodo} &= 608450 \text{ Kcal/min. (13-3)} \end{aligned}$$

Segundo periodo (kilocalorias)

$$\begin{aligned} \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 503.9 \times 2430 &= 1'224\,477 \\ \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 &= 252 \times 8100 &= 2'041\,200 \\ \text{Fe} &= 1201.2 \times (13.63/24.52) \times 1151 &= 768\,539 \\ &&4'034\,216 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor generado durante el 2º periodo} &= 4'034\,216 \times 15.56 = 259268 \text{ Kcal/min} \\ \text{Calor generado durante el 2º periodo} &= 259268 \text{ Kcal/min. (13-3)} \end{aligned}$$

Tercer periodo (kilocalorias)

$$\begin{aligned} \text{P} &= 474.5 \times 5912 &= 2'805.244 \\ \text{Fe} &= 1201.2 \times (6.21/24.52) \times 1151 &= 350\,156 \\ &&3'155\,400 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CaO} &= 5270 \times 0.36 = 2059.2 \text{ Kg} \\ \text{Calor de formación de escoria} &= 2058.2 \times 700 = 1'441.440 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor generado durante el 3º periodo} &= (3'155\,400 + 1'441\,440) \times 7.09 = 648355 \text{ Kcal/min} \\ \text{Calor generado durante el 3º periodo} &= 648355 \text{ Kcal/min. (13-3)} \end{aligned}$$

EJERCICIO Nº14 (7)

El gas obtenido en un productor de gas, presenta el siguiente análisis

CO ₂	3.0%
CO	26.0%
CH ₄	3.0%
H ₂	14.0%
N ₂	54.0%

Este gas es quemado en un horno de hogar abierto (open-hearth), utilizando para ello 10% de aire en exceso. En adición a este 10% de aire en exceso para la combustión, se filtra al horno a través de las puertas 50% de aire en exceso. Los gases productos de la combustión pasan a través de regeneradores para precalentar el gas de entrada y el aire, y luego a través de una cascada para pérdidas de calor salen a las chimeneas. En adición al carbono del gas, 0.054 kilogramos de carbono por metro cubico de gas son quemados a CO por el oxígeno de la carga, y de CO a CO₂ por el oxígeno del aire que entra a través de las puertas del horno.

Se observan las siguientes temperaturas

- Aire a regeneradores, 35°C; aire precalentado, 1000°C
- Gas a regeneradores, 600°C, gas precalentado, 1100°C
- Temperatura máxima de la llama, 2100°C
- Productos de combustión salen del horno a 1550°C

Productos de combustión dejan los regeneradores a 680°C
 Productos de combustión dejan la caldera a 350°C

PREGUNTAS

- 1 El aire utilizado por metro cubico de gas (a) para combustión (b) por filtración
- 2 La composición de los productos de combustión antes y después de mezclarse con el aire filtrado.
3. El calor total que entra al horno
4. El calor en los gases del horno a la temperatura máxima de la flama
5. El calor en los productos de combustión al salir del horno
- 6 El calor en los productos de combustión al salir de los regeneradores.
7. El calor en los productos de combustión al salir de la caldera.
8. El porcentaje de distribución del calor de la operación
- 9 La eficiencia de operación de los regeneradores (gas y aire combinados)
- 10 Los porcentajes de los productos de combustión que van a los regeneradores de aire y de gas.
- 11 El porcentaje del precalentamiento en el gas que es suministrado por los regeneradores y por el productor de gas.

SOLUCION

1

La operación del horno de hogar abierto que describe el ejercicio, se puede visualizar en el esquema que aparece a continuación

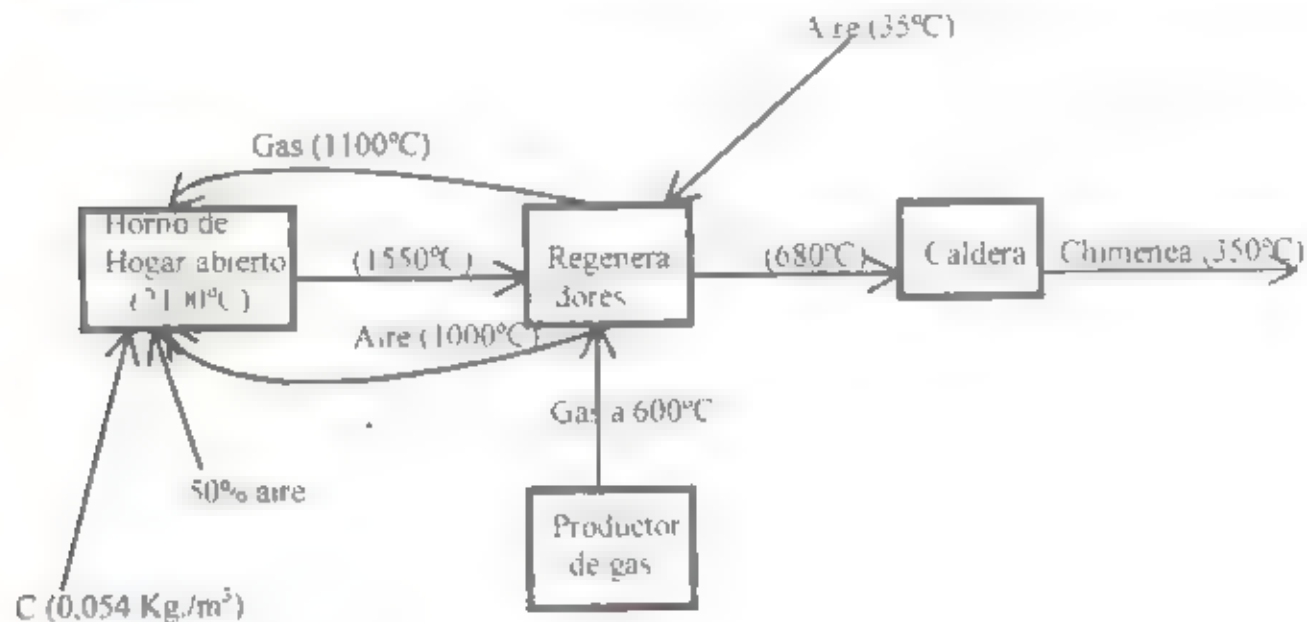
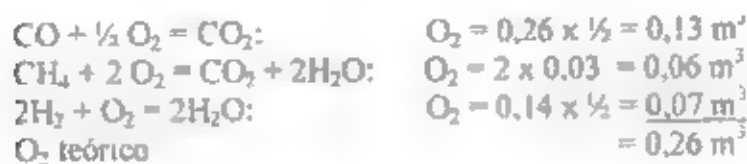


Figura # 1: Operación de un Horno de Hogar Abierto (open - hearth)

Reacciones de combustión del gas



$$\text{Aire teórico} = 0,26/0,21 = 1,24 \text{ m}^3$$

$$(a): \text{aire total (10\% exceso)} = 1,24 \times 1,1 = 1,36 \text{ m}^3$$

$$(a) \text{ Aire utilizado} = 1,36 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de gas (14-)}$$

h) Aire total utilizado (50% exceso) = $1,24 \times 0,5 = 0,62 \text{ m}^3$

(b) Aire utilizado con 50% exceso por filtración = $0,62 \text{ m}^3$ (14-1)

2

P.C antes de mezclarse con aire filtrado = $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Composición de estos P.C (14-2)

$$\begin{aligned}\text{N}_2 &= 1,36 \times 0,79 + 0,54 = 1,61 \text{ m}^3 = 74,5\% \\ \text{O}_2 &= (1,36 - 1,24) \times 0,21 = 0,03 \text{ m}^3 = 1,4\% \\ \text{CO}_2 &= 0,03 + 0,26 + 0,03 = 0,32 \text{ m}^3 = 14,8\% \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,06 + 0,14 = 0,20 \text{ m}^3 = 9,7\% \\ & \quad \underline{2,16 \text{ m}^3 = 100,0\%}\end{aligned}$$

P.C después de mezclarse con el aire filtrado = $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Total aire = $1,36 + 0,62 = 1,98 \text{ m}^3$

Aire total exceso = $1,98 - 1,24 = 0,74 \text{ m}^3$

O_2 de este = $0,74 \times 0,21 = 0,1554 \text{ m}^3$

$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$; $\text{CO} = 0,054 \times 22,4/12 = 0,1008 \text{ m}^3$

$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2$; $\text{CO}_2 = 0,1008 \text{ m}^3$

$\text{O}_2 = 0,1008 \times \frac{1}{2} = 0,0504 \text{ m}^3$

Composición de estos P.C (14-2)

$$\begin{aligned}\text{N}_2 &= 1,98 \times 0,79 + 0,54 = 2,10 \text{ m}^3 = 74,5\% \\ \text{O}_2 &= 0,1554 - 0,0504 = 0,10 \text{ m}^3 = 3,5\% \\ \text{CO}_2 &= 0,1008 + 0,32 = 0,42 \text{ m}^3 = 14,9\% \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,20 \text{ m}^3 = 7,1\% \\ & \quad \underline{2,82 \text{ m}^3 = 100,0\%}\end{aligned}$$

3

Calor que entra al horno = potencia calorífica del gas + Precalentamiento del aire + precalentamiento del gas

Potencia calorífica del gas

$\text{CO} = 0,26 \times 3034 = 788,84 \text{ Kcal}$

$\text{CH}_4 = 0,03 \times 8560 = 256,80$

$\text{H}_2 = 0,14 \times 2582 = 361,48$

Total = $1407,12 \text{ Kcal}$

Precalentamientos a 1000°C

Aire = $1,36 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 440,94 \text{ Kcal}$

Gas,

$\text{CO}_2 = 0,03 \times (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 16,7$

$\text{CO} + \text{N}_2 = (0,26 + 0,54) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 287,1$

$\text{CH}_4 = 0,03 \times (0,380 + 2,1 \times 10^{-4} \times 1000) \times 1000 = 20,1$

$\text{H}_2 = 0,14 \times (0,301 + 2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 49,8$

Total = $373,7 \text{ Kcal}$

Calor total que entra el horno = $1407,12 + 440,94 + 373,7 = 2221 \text{ Kcal}$

Calor total que entra al horno = 2221 Kcal (14-3)

1

Temperatura máxima de la llama = 2100°C

Contenido de calor de los productos de combustión a esta temperatura

$$\begin{aligned}
 N_2 + O_2 &= (1,61 + 0,03) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 2100) \times 2100 = 1199 \\
 CO_2 &= 0,32 \times (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 2100) \times 2100 = 400 \\
 H_2O &= 0,20 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 2100) \times 2100 = 201 \\
 \text{Total} &= 1800 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Calor en los P.C a 2100°C = 1800 Kcal. (14-4)

5

Calor en los productos de combustión que salen del horno a 1550°C

$$\begin{aligned}
 N_2 + O_2 &= (2,1 + 0,1) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1550) \times 1550 = 1146 \\
 CO_2 &= 0,42 \times (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 1550) \times 1550 = 355 \\
 H_2O &= 0,20 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 1550) \times 1550 = 140 \\
 \text{Total} &= 1641 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Calor en los P.C que salen del horno = 1641 Kcal (14-5)

6

Calor en los productos de combustión que salen de los regeneradores a 680°C

$$\begin{aligned}
 N_2 + CO &= (2,1 + 0,1) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 680) \times 680 = 475 \\
 CO_2 &= 0,42 \times (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 680) \times 680 = 133 \\
 H_2O &= 0,20 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 680) \times 680 = 55 \\
 \text{Total} &= 663 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Calor en los P.C que salen de los regeneradores = 663 Kcal (14-6)

7

Calor en los productos de combustión que salen de la caldera a 350°C

Para los volúmenes y calores específicos de los casos anteriores, si sustituimos las temperaturas por 350°C, se obtienen los resultados que se dan abajo

$$\begin{aligned}
 N_2 + O_2 &= 239 \\
 CO_2 &= 64 \\
 H_2O &= 27 \\
 \text{Total} &= 330 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Calor en los P.C que salen de la caldera a 350°C = 330 Kcal. (14-7)

8

Calor que entra al horno = 2221 Kcal

Calor de la combustión = 1800 Kcal

Pérdidas por combustión = 2221 - 1800 = 421 Kcal

% perdido en la combustión = $100 \times (421 / 2221) = 19$

Pérdidas por combustión = 19% (14-8)

9

Eficiencia en regeneradores = calor utilizado/calor que entra

Calor utilizado = calor en precalentamientos de aire + gas

Calor que entra = calor en P.C a 1550°C + calor que lleva el aire a 350°C + calor que lleva el gas a 600°C

Contenido de calor del aire a 35°C

$$1,29 \times 10^{-3} \times (2,2 \times 10^3 \times 35) \times 35 = 14 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor del gas a 600°C

$$\text{CO}_2 = 8,0$$

$$\text{CO} = 49,0$$

$$\text{CH}_4 = 9,0$$

$$\text{H}_2 = 26,0$$

$$\text{N}_2 = 102,0$$

$$\text{Total} = 194,0 \text{ Kcal}$$

Calor por precalentamiento del aire = 441 Kcal

Calor en gas precalentado = 373,7 Kcal

Calor utilizado en llevar el gas a 1100°C = $373,3 - 194 = 179,7 \text{ Kcal}$.

$$\text{Calor utilizado} = 441 + 179,7 = 620,7 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor que entra a regeneradores} = 1641 + 194 + 14 = 1849 \text{ Kcal}$$

$$\text{Eficiencia} = 620,7/1849 = 0,336$$

$$\text{Eficiencia de los regeneradores} = 33,6\% (14-9)$$

10

Calor con que entra el aire a los regeneradores = 14 Kcal

Calor con que sale el aire de los regeneradores = 441 Kcal

Calor aportado por los regeneradores al aire = $441 - 14 = 427 \text{ Kcal}$

Calor con que entra el gas a los regeneradores = 194 Kcal

Calor con que sale el gas de los regeneradores = 374 Kcal

Calor aportado por los regeneradores al gas = $374 - 194 = 180 \text{ Kcal}$

$$\text{Total calor efectivo} = 427 + 180 = 607 \text{ Kcal}$$

Productos de combustión para regenerador en aire = $2,82 \times (427/607) = 1,984 \text{ m}^3$

Productos de combustión para regeneradores en aire = $1,984/2,82 = 0,704$

$$\text{P.C. para regeneradores en aire} = 70,4\% (14-10)$$

Productos de combustión para regeneradores en gas = $2,82 \times (180/607) = 0,836 \text{ m}^3$

Productos de combustión para regeneradores en gas = $0,836/2,82 = 0,296$

$$\text{P.C. para regeneradores en gas} = 29,6\% (14-10)$$

11

Precalentamiento del gas aportado por regeneradores = $180/374 = 0,4813$

$$\text{Precalentamiento del gas aportado por regeneradores} = 48,13\% (14-11)$$

Precalentamiento del gas aportado por el productor de gas = $194/374 = 0,5187$

$$\text{Precalentamiento del gas portado por el productor de gas} = 51,78\% (14-11)$$

EJERCICIO N°15 (7)

Un horno para aceros de hogar abierto (basico), es cargado con 20 toneladas de chatarra y 2 toneladas de arrabio. Durante el calentamiento se adicionan 3 toneladas de mineral de hierro y 1 tonelada de CaCO_3 como para producir una escoria final con 40%CaO

Para la desoxidación se utilizan 400 kilogramos de ferromanganeso y 180 kilogramos de

Se producen 39800 kilogramos de acero final cuyo analisis es 0,3% C, 0,2% Mn, 0,1% Si, 0,06% P y 99,34% Fe.

El análisis de los materiales utilizados fue el siguiente:

	Chatarra de acero (%)	Arrabio (%)	Ferromanganeso (%)	Ferrosio (%)	Mineral de hierro (%)
Fe	99,00	92,6	12	50	80% Fe_2O_3
C	0,50	4,0	6		
Mn	0,30	1,5	80		4% MnO
Si	0,12	0,8	2	50	16% SiO_2
P	0,08	1,1			

El carbono oxidado pasa a CO

Asumir que la mitad del Fe en la escoria (como FeO) proviene del mineral y la otra mitad de la oxidación es producida por los gases del horno

PREGUNTAS

1. El peso y la composición de la escoria
2. El peso del CaCO_3 necesitado
3. La proporción de la oxidación en el horno que es realizada por el mineral de hierro y por los gases del horno.

SOLUCION



$$\begin{aligned}\text{Mn en acero final} &= 39800 \times 0,002 = 79,6 \text{ Kg.} \\ \text{Mn en chatarra} &= 20000 \times 0,003 = 60 \\ \text{Mn en arrabio} &= 20000 \times 0,015 = 300 \\ \text{Mn en Fe-Mn} &= 400 \times 0,80 = 320 \\ \text{MnO en mineral} &= 3000 \times 0,04 = 120\end{aligned}$$

Mn cargado, sin Mn en el mineral = $60 + 300 + 320 = 680 \text{ Kg}$
Extrayendo en Mn que queda en el acero nos queda el Mn a escorificar

$$\begin{aligned}\text{Mn a oxidar} &= 680 - 79,6 = 600,4 \text{ Kg} \\ \text{MnO a escoria} &= 120 + 600,4 \times (71/55) = 895 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Si en acero final} &= 39800 \times 0,001 = 39,8 \text{ Kg} \\ \text{Si en chatarra} &= 20000 \times 0,0012 = 24 \\ \text{Si en arrabio} &= 20000 \times 0,008 = 160 \\ \text{Si en Fe-Mn} &= 400 \times 0,02 = 8 \\ \text{Si en Fe-Si} &= 180 \times 0,50 = 90 \\ \text{Si total cargado sin el del mineral} &= 282 \text{ Kg.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Si a ser oxidado} &= 282 - 39,8 = 242,2 \text{ Kg.} \\ \text{SiO}_2 \text{ a escoria} &= 242,2 + 3000 \times 0,16 = 999 \text{ Kg.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{P en acero final} &= 39800 \times 0,0006 = 23,88 \text{ Kg.} \\ \text{P en chatarra} &= 20000 \times 0,0008 = 16 \\ \text{P en arrabio} &= 20000 \times 0,011 = 220 \\ \text{P cargado} &= 236 \text{ Kg.} \\ \text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 &= 236 - 23,88 = 212,12 \text{ Kg.} \\ \text{P}_2\text{O}_5 \text{ a escoria} &= 212,12 \times (142/62) = 485,8 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\text{Fe en mineral} = 39800 \times 0,9934 = 39537,32 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en escoria} = 20000 \times 0,99 = 19800$$

$$\text{Fe en escoria} = 20000 \times 0,926 = 18520$$

$$\text{Fe en Fe-Mn} = 400 \times 0,12 = 48$$

$$\text{Fe en Fe-Si} = 80 \times 0,50 = 40$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ en mineral} = 2400 \times (112/160) = 1680 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 19800 + 18520 + 48 + 40 + 1680 = 39537,32 = 600,68 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO a escoria} = 600,68 \times (72/56) = 772,3 \text{ Kg}$$

$$\text{600,68 Kg escoria} = \text{FeO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{SiO}_2 + \text{MnO} = 772,3 + 485,8 + 999 + 895 = 3152,1 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO} = 3152,1 \times (40/60) = 2101,4 \text{ Kg}$$

Peso y composición de la escoria (15-1)

FeO	=	772,3	=	14,7%
P ₂ O ₅	=	485,8	=	9,3%
SiO ₂	=	999,0	=	19,0%
MnO	=	895,0	=	17,0%
CaO	=	2101,4	=	40,0%
Escoria total = 5253,5 Kg.				100,0%

$$\text{CaCO}_3 = 2101,4 \times 100/56 = 3752,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del CaCO}_3 = 3752,5 \text{ Kg. (15-2)}$$

$$\text{Fe en escoria} = 600,68 \text{ Kg}$$

$$\text{De este, } 600,68 \times \frac{1}{2} = 300,34 \text{ Kg, proviene del Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{FeO resultante} = 300,34 \times 72/56 = 386,15 \text{ Kg}$$



$$\text{O oxidante} = 386,15 \times 16/144 = 42,9 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO formado por gases} = 386,15 \text{ Kg}$$

$$\text{O de este} = 386,15 \times 16/72 = 85,8 \text{ Kg}$$

$$\text{Total O oxidante} = 42,9 + 85,8 = 128,7 \text{ Kg}$$

$$\text{Oxidación realizada por el mineral de Fe} = 42,9/128,7 = 0,333$$

$$\text{Oxidación realizada por el mineral de Fe} = 33,3\% \text{ (15-3)}$$

$$\text{Oxidación realizada por los gases} = 85,8/128,7 = 0,667$$

$$\text{Oxidación realizada por los gases} = 66,7\% \text{ (15-3)}$$

EJERCICIO N°16 (7)

Un horno de hogar abierto procesa la carga que aparece en la siguiente pagina

Se producen 75 toneladas de un acero que contiene 0,1% C, 0,2% Mn, 0,02% P y

0,1% FeO en solución

La escoria producida contiene

SiO ₂	15,0%	FeO	17,0%
CaO	52,0	MgO	5,5
MnO	9,5	P ₂ O ₅	1,0

CARGA DEL HORNO

Arrabio líquido (45 toneladas) (%)	Chatarra (30 toneladas) (%)	Mineral (8 toneladas) (%)		Fundente (8 toneladas) (%)	
C	1.10	FeO ₂	83.00	CaCO ₃	99
Si	0.05	SiO ₂	5.00	SiO ₂	1
Mn	0.80	Mn	0.10		
P	0.03	P	0.07		
Fe	99.89	Fe	99.32		

El horno se encuentra recubierto con dolomita calcinada. Después de colar en la cuchara se adicionan al acero 1000 libras de ferromanganeso (80%Mn, 15%Fe, 5%C).

PREGUNTAS

1. El peso de la escoria producida
2. Los pesos del CaO y el MgO que pasan a la escoria provenientes del revestimiento del horno
3. Los pesos de Fe, Mn y P inexplicables o extraños (probablemente parcialmente debidos a volatilización y parcialmente debidos a al redondeo de cifras correspondientes a establecimiento de los pesos y los análisis).
4. La composición del acero final

SOLUCION

$$\text{Peso del acero} = 75 \times 2000 = 150000 \text{ libras}$$

$$\begin{aligned} C &= 150000 \times 0.001 = 150 \\ Mn &= \quad \times 0.002 = 300 \\ P &= \quad \times 0.0002 = 30 \\ FeO &= \quad \times 0.001 = 150 \\ Fe &= \quad \times 0.9958 = 149370 \end{aligned}$$

Distribución de la carga

$$\text{Arrabio} = 45 \times 2000 = 90000 \text{ libras}$$

$$\begin{aligned} Si &= 90000 \times 0.01 = 900 \\ C &= \quad \times 0.043 = 3870 \\ Mn &= \quad \times 0.017 = 1530 \\ P &= \quad \times 0.0011 = 99 \\ Fe &= \quad \times 0.9289 = 83601 \end{aligned}$$

$$\text{Chatarra} = 30 \times 2000 = 60000 \text{ libras}$$

$$\begin{aligned} C &= 60000 \times 0.001 = 60 \\ Si &= \quad \times 0.0005 = 30 \\ Mn &= \quad \times 0.005 = 300 \\ P &= \quad \times 0.0003 = 18 \\ Fe &= \quad \times 0.9932 = 59592 \end{aligned}$$

$$\text{Mineral} = 8 \times 2000 = 16000 \text{ libras}$$

$$\begin{aligned} FeO_2 &= 16000 \times 0.80 = 12800 \\ SiO_2 &= \quad \times 0.05 = 800 \\ Mn &= \quad \times 0.001 = 16 \\ P &= \quad \times 0.0007 = 11.2 \\ \text{Fundente} &= 8 \times 2000 = 16000 \text{ libras} \end{aligned}$$

$$\text{CaCO}_3 = 16000 \times 0,99 = 15840$$

$$\text{SiO}_2 = \quad \times 0,01 = 160$$

acero no contiene Si de modo que todo el que aparece en la carga es oxidado a SiO_2 y pasa a escoria

$$\text{Si en arrabio + chatarra} = 900 + 30 = 930 \text{ lbs}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ formado} = 930 \times 60/28 = 1993 \text{ lbs}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 1993 + 800 + 160 = 2953 \text{ lbs}$$

$$\text{Escoria} = 2953/0,15 = 19687 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso de la escoria producida} = 19687 \text{ libras (16-1)}$$

$$\text{CaO en escoria} = 19687 \times 0,52 = 10237 \text{ lbs}$$

$$\text{CaO del CaCO}_3 = 15840 \times 56/100 = 8870,4 \text{ lbs}$$

$$\text{CaO del revestimiento} = 10237 - 8870,4 = 1366,6 \text{ lbs}$$

$$\text{CaO proveniente del revestimiento} = 1366,6 \text{ libras (16-2)}$$

Ningun componente de la carga contiene MgO ni nada que lo pueda generar, de modo que el que aparezca en la escoria debe provenir del revestimiento

$$\text{MgO (escoria)} = \text{MgO (revestimiento)} = 19687 \times 0,055 = 1083$$

$$\text{MgO proveniente del revestimiento} = 1083 \text{ libras (16-2)}$$

$$\text{FeO en escoria} = 19687 \times 0,17 = 3347 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe de este} = 3347 \times 56/72 = 2603$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = 12800 \times 112/160 = 8960$$

$$\text{Fe cargado} = 8960 + 83601 + 59592 = 152153 \text{ lbs}$$

$$\text{Fe del FeO del acero} = 150 \times 56/72 = 117$$

$$\text{Fe teórico en escoria} = 52,53 - 149370 (\text{acero}) - 117 = 2666$$

$$\text{Fe inexplicable} = 2666 - 2600 = 66$$

$$\text{Fe inexplicable} = 66 \text{ libras (16-3)}$$

$$\text{MnO en escoria} = 19687 \times 0,095 = 1870,3 \text{ lbs}$$

$$\text{Mn de este} = 1870,3 \times 55/71 = 1449$$

$$\text{Mn en acero} = 300$$

$$\text{Mn cargado} = 1530 + 300 + 16 = 1846$$

$$\text{Mn teórico en escoria} = 1846 - 300 (\text{acero}) = 1546$$

$$\text{Mn inexplicable} = 1546 - 1449 = 97$$

$$\text{Mn inexplicable} = 97 \text{ libras (16-3)}$$

$$\text{P cargado} = 99 + 18 + 11,2 = 128,2 \text{ libras}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 \text{ en escoria} = 19687 \times 0,01 = 197$$

$$\text{P de este} = 197 \times 62/142 = 86$$

$$\text{P teórico en escoria} = 128,2 - 30 (\text{acero}) = 98,2$$

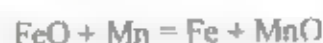
$$\text{P inexplicable} = 98,2 - 86 = 12,2$$

$$\text{P inexplicable} = 12,2 \text{ libras (16-3)}$$

$$\text{Acero final} = \text{Fe} + \text{C} + \text{Mn} + \text{P}$$

$$\text{Fe total} = \text{Fe (acero inicial)} + \text{Fe (Fe - Mn)} = 149370 + 1000 \times 0,15 = 149520 \text{ lbs.}$$

Debido a que en el acero inicial hay 150 libras de FeO disuelto, al adicionar la ferroaleación, ocurre la siguiente reacción:



$$\text{Mn oxidado} = 150 \times 55/72 = 114,6 \text{ libras.}$$

$$\text{Fe reducido} = 150 \times 56/72 = 116,7$$

$$\text{Fe en acero final} = 149520 + 116,7 = 149636,7$$

$$\text{Mn en acero final} = 300 + 1000 \times 0,8 - 114,6 = 985,4$$

$$\text{C en acero final} = 150 + 1000 \times 0,05 = 200$$

Composición del acero final (16-4)

Fe	=	149636,7 lbs.	=	99,20%
C	=	200,0	=	0,13%
Mn	=	985,4	=	0,65%
P	=	30,0	=	0,02%
Acero final	=	150852,1 lbs.	=	100,00%

EJERCICIO N°17 (7)

Un horno de hogar abierto (basico) para aceros, procesa una carga de 80 toneladas de arrabio y chatarra que tiene en promedio la siguiente composición:

C	2,7%
Mn	0,7
Si	1,0
P	0,8
Fe	94,8

El metal final (listo para recarburación) debe contener un quinto del carbono original y un séptimo del manganeso original, pero nada de silicio ni fósforo.

La oxidación de las impurezas está acompañada parcialmente por los gases del horno y parcialmente por la adición de un mineral que contiene 85% Fe₂O₃ y 15% SiO₂. Asumir la división de la oxidación del modo siguiente:

Si, todo por gases.....	a SiO ₂
Mn, la mitad por gases y la mitad por mineral.....	a MnO
C, un quinto por gases, cuatro quintos por mineral.....	a CO
P, todo por el mineral.....	a P ₂ O ₅

La escoria deberá contener FeO equivalente al 2% del hierro en el arrabio y la chatarra cargados. El FeO está oxidado la mitad por los gases y la otra mitad es reducido del Fe₂O₃. Se carga suficiente CaCO₃ como para producir una escoria con 40% CaO.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral necesario.
2. El peso de la escoria producida.
3. El peso del CaCO₃ utilizado.
4. El peso del baño final.

SOLUCION

En el mineral el agente oxidante es el Fe_2O_3

$$\text{Carga} = 80 \times 2000 = 160000 \text{ libras.}$$

$$\text{C} = 160000 \times 0,027 = 4320$$

$$\text{C oxidado} = 4320 \times 4,5 = 3456$$

$$\text{C oxidado por el mineral} = 3456 \times 4/5 = 2764,8$$

$$\text{O de este} = 2764,8 \times 16/12 = 3686,4$$

$$\text{Mn} = 160000 \times 0,007 = 1120$$

$$\text{Mn oxidado} = 1120 \times 6/7 = 960$$

$$\text{Mn oxidado por el mineral} = 960 \times 1/2 = 480$$

$$\text{O de este} = 480 \times 16/55 = 139,6$$

$$\text{P cargado} = 160000 \times 0,008 = 1280$$

$$\text{O de este} = 1280 \times 80/62 = 1651,6$$

$$\text{Fe (arrabio + chatarra)} = 160000 \times 0,948 = 151680$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 151680 \times 0,02 = 3033,6$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO del mineral} = 3033,6 \times 1/2 = 1516,8$$

$$\text{O de este} = 1516,8 \times 16/56 = 433,3$$

Sea X = peso del mineral

$$\text{O del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,85X \times 48/160 = 0,255X$$

$$\text{O aportado por el } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 3686,4 + 139,6 + 1651,6 + 433,3 = 5911$$

$$5911 = 0,255X$$

$$X = 5911/0,255 = 23180,4$$

$$\text{Peso del mineral} = 23180,4 \text{ libras (17-1)}$$

$$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{FeO} + \text{CaO}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en mineral} = 23180 \times 0,15 = 3477,1 \text{ libras}$$

$$\text{Si en arrabio + chatarra} = 160000 \times 0,01 = 1600$$

$$\text{SiO}_2 \text{ formado} = 1600 \times 60/28 = 3429$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 3477,1 + 3429 = 6906,1 \text{ libras.}$$

$$\text{MnO} = 960 \times 71/55 = 1239,3 \text{ libras}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 1280 \times 142/62 = 2932 \text{ libras}$$

$$\text{FeO total} = 3033,6 \times 72/56 = 3900,3 \text{ libras.}$$

$$60\% \text{ de escoria } \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{FeO} = 6906,1 + 1239,3 + 2932 + 3900,3 = 14977,7$$

$$\text{Escoria} = 14977,7/0,6 = 24963$$

$$\text{Peso de la escoria} = 24963 \text{ libras. (17-2)}$$

$$\text{CaO} = 24963 \times 0,4 = 9989,4 \text{ libras}$$

$$\text{CaCO}_3 = 9989,4 \times 100/56 = 17838,1$$

$$\text{Peso de CaCO}_3 \text{ utilizado} = 17838,1 \text{ libras. (17-3)}$$

4

$$\text{Baño final} = \text{C} + \text{Mn} + \text{Fe}$$

$$\text{C en baño final} = 4320 - 3456 = 864$$

$$\text{Mn en baño final} = 1120 \times 1/7 = 160$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 23180,4 \times 0,85 = 19703,3$$

$$\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 = 19703,3 \times 112/160 = 13792,3$$

$$\text{Fe de este que pasa al acero} = 13792,3 - 1516,8 = 12275,5$$

$$\text{Fe en baño final} = 151680 + 12275,5 - 1516,8 (\text{gases}) = 162438,7$$

$$\text{Baño final} = 162438,7 + 160 + 864 = 163462,7$$

$$\text{Baño final} = 163462,7 \text{ libras (17-4)}$$

EJERCICIO N°18 (7)

Un horno basico para aceros, de hogar abierto, recibe 40 toneladas de arrabio y chatarra con una composición promedia como la siguiente:

Fe	93,7%
C	3,0
Mn	0,8
Si	1,1
P	1,4

Se adiciona también suficiente mineral para completar tres cuartos de la oxidación de las impurezas (C a CO, Mn a MnO, Si a SiO₂, P a P₂O₅) y suficiente cal como para producir una escoria con 40%CaO. El mineral contiene 82%Fe₂O₃, 14%SiO₂ y 4%Al₂O₃. La cal es CaO puro. 2% del Fe total cargado (incluyendo el Fe en el mineral), se pierde en la escoria como FeO.

El horno utiliza 50000 metros cubicos de gas obtenido en un productor de gas, con el siguiente análisis

CO	25%
H ₂	12
CO ₂	8
H ₂ O	4
N ₂	51

Este es quemado con un 20% de aire en exceso. Los productos de combustión completan la oxidación de las impurezas, se oxida el Fe que entra a la escoria y se cambia el CO a CO₂.

Los gases del horno pasan a los regeneradores a 1500°C., y estos precalientan tanto al aire como al gas combustible a 700°C.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral utilizado, en kilogramos
2. El peso de la escoria producida
3. El peso del Fe producido
4. El volumen de los gases que salen del horno
5. La eficiencia térmica de los regeneradores

SOLUCION

1

$$\text{C en arrabio y chatarra} = 40000 \times 0,03 = 1200 \text{ Kg.}$$

$$\text{O de este} \rightarrow \text{CO} = 1200 \times 16/12 = 1600 \text{ Kg.}$$

$$\text{Mn en arrabio y chatarra} = 40000 \times 0,008 = 320 \text{ Kg}$$

$$\text{Mn} \rightarrow \text{MnO} \cdot \text{O} = 320 \times 16,55 = 93,1 \text{ Kg}$$

$$\text{Si en arrabio y chatarra} = 40000 \times 0,011 = 440 \text{ Kg}$$

$$\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot \text{O} = 440 \times 32/28 = 502,8 \text{ Kg}$$

$$\text{P en arrabio y chatarra} = 40000 \times 0,014 = 560 \text{ Kg}$$

$$\text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{O} = 560 \times 80/62 = 722,6 \text{ Kg}$$

$$\text{O total para oxidar impurezas} = 1600 + 93,1 + 502,8 + 722,6 = 2918,5 \text{ Kg}$$

$\frac{3}{4}$ de este provienen del Fe_2O_3 .

$$\text{O proveniente del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 2918,5 \times \frac{3}{4} = 2188,9 \text{ Kg}$$

Sea X = peso del mineral.

$$\text{O del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,82X \times 48/160 = 0,246X$$

$$\text{Fe del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,82X - 0,246X = 0,574X$$

$$\text{De este Fe, 2\% pasa a la escoria} = 0,574X \times 0,02 = 0,01148X$$

$$\text{O de este Fe} = 0,01148 \times 16,56 = 0,00328X$$

$$\text{O total del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 2188,9 + 0,00328X = 0,246X \therefore$$

$$2188,9 = 0,246 - 0,00328 = 0,242X \therefore$$

$$X = 2188,9/0,242 = 9045$$

$$\text{Peso del mineral} = 2045 \text{ Kg. (18-1)}$$

2.

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{CaO}$$

$$\text{MnO} = 320 \times 71/55 = 413,1 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ formado por oxidación} = 440 + 502,8 = 942,8 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ del mineral} = 9045 \times 0,14 = 1266,3 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ a escoria} = 942,8 + 1266,3 = 2209,1 \text{ Kg}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 \text{ a escoria} = 722,6 + 560 = 1282,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ a escoria} = 9045 \times 0,04 = 361,8 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 9045 \times 0,574 = 5191,8 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe en arrabio y chatarra} = 40000 \times 0,937 = 37480 \text{ Kg}$$

$$\text{Total Fe cargado} = 5191,8 + 37480 = 42671,8 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 42671,8 \times 0,02 = 853,4 \text{ Kg}$$

$$\text{FeO} = 853,4 \times 72/56 = 1097,2 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} 60\% \text{ de escoria} &= \text{FeO} + \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{P}_2\text{O}_5 \\ &= 1097,2 + 413,1 + 2209,1 + 1282,6 + 361,8 = 5363,8 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Escoria} = 5363,8/0,60 = 8939,7$$

$$\text{Peso de la escoria} = 8940 \text{ Kg. (18-2)}$$

3

$$\text{Fe} = 42671,8 \times 0,98 = 41818,4$$

$$\text{Fe producido} = 41818,4 \text{ Kg. (18-3)}$$

4

$$\text{Gases del horno} = \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$$

$$\text{Gas combustible} = 50000 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} = 50000 \times 0,25 = 12500 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2 = 50000 \times 0,12 = 6000$$

$$\text{CO}_2 = 50000 \times 0,08 = 4000$$

$$\text{H}_2\text{O} = 50000 \times 0,04 = 2000$$

$$\text{N}_2 = 50000 \times 0,51 = 25500$$

$$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2: \text{CO}_2 = 12500$$

$$\text{O}_2 = 12500 \times \frac{1}{2} = 6250$$

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}: \text{H}_2\text{O} = 6000$$

$$\text{O}_2 = 6000 \times \frac{1}{2} = 3000$$

$$\text{O}_2 \text{ teórico} = 6250 + 3000 = 9250$$

$$\text{O}_2 \text{ total} = 9250 \times 1,2 = 11100$$

$$\text{O}_2 \text{ exceso} = 11100 - 9250 = 1850$$

$$\text{N}_2 \text{ del aire} = 11100 \times 79/21 = 41757$$

Impurezas oxidadas por el aire:

$$\text{Mn} = 329 \times \frac{1}{4} = 80 \text{ Kg.}$$

$$\text{O} = 80 \times 16/55 = 23,3 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del Si} = 502,8 \times \frac{1}{4} = 125,7 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del P} = 722,6 \times \frac{1}{4} = 180,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del C} = 1600 \times \frac{1}{4} = 400 \text{ Kg.}$$

$$\text{O del FeO} = 1097,2 - 853,4 = 243,8 \text{ Kg.}$$

$$\text{O de oxidación de impurezas} = 23,3 + 125,7 + 180,6 + 400 + 243,8 = 973,4 \text{ Kg.} = 681,4 \text{ m}^3$$

$$\text{CO del C} = 1600 + 1200 = 2800 \text{ Kg.} = 2240 \text{ m}^3$$

$$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}_2: \text{CO}_2 = 2240$$

$$\text{O}_2 = 2240 \times \frac{1}{2} = 1120$$

$$\text{O}_2 \text{ libre (a gas)} = 1850 - 1120 = 730 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ total} = 12500 + 4000 + 2240 = 18740 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O total} = 2000 + 6000 = 8000 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 25500 + 41757 = 67257 \text{ m}^3$$

Volumen y composición del gas que sale del horno (18-4)

N ₂	=	67257,0 m ³	=	71,51%
O ₂	=	48,6	=	0,05%
H ₂ O	=	8000,0	=	8,51%
CO ₂	=	18740,0	=	19,93%
Total gas	=	94045,6 m ³	=	100,00%

5.

El movimiento térmico de los gases se puede observar en el esquema de la figura que se muestra en la página siguiente:

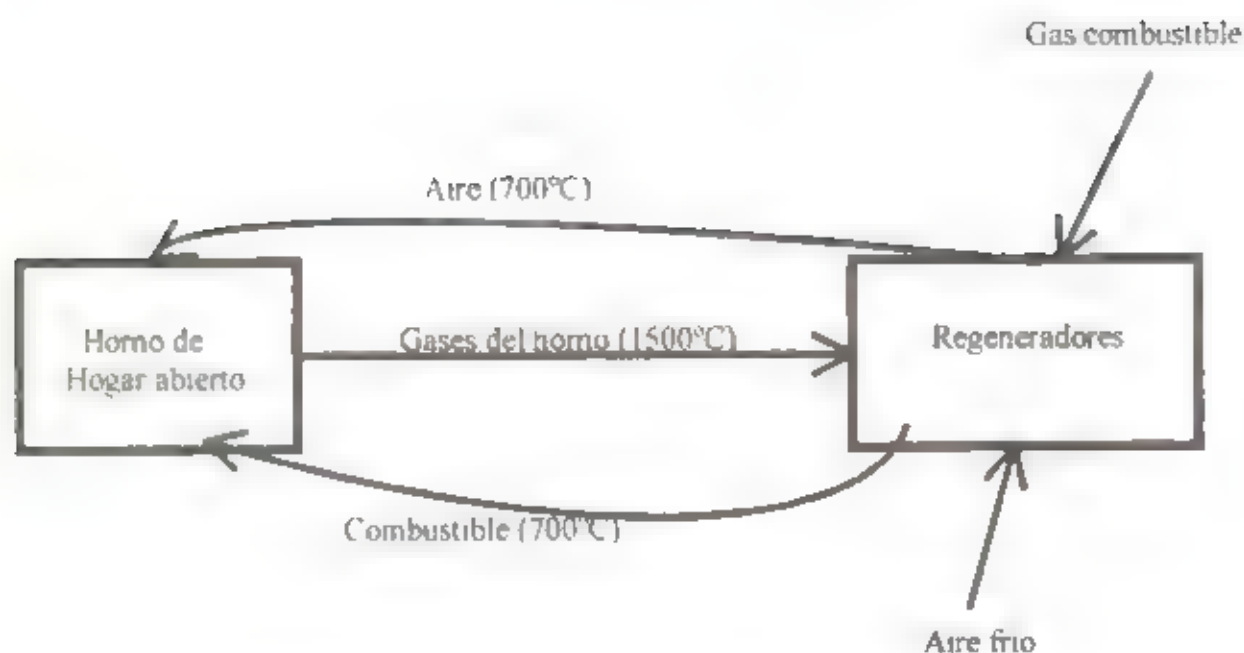


Figura # 2: Esquema térmico para un horno de Hogar Abierto.

Eficiencia térmica = $100 \times (\text{Calor utilizado} / \text{calor aportado})$

Contenido de calor de los gases del horno al entrar a los regeneradores a 1500°C

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 18740 \times (0.406 + 9.0 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 15'207.510 \text{ Kcal} \\ \text{H}_2\text{O} &= 8000 \times (0.373 + 5.0 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 5'376.000 \text{ "} \\ \text{N}_2 + \text{O}_2 &= 67305.6 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 33'821.064 \text{ "} \\ &= 54'404.574 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Precalentamiento del aire a 700°C

$$\text{Aire} = 41757 / 0.21 = 52857 \text{ m}^3$$

$$52857 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 11'743.768 \text{ kcal}$$

Precalentamiento del gas combustible a 700°C

$$\begin{aligned} \text{H}_2 &= 6000 \times (0.301 + 2.0 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 1'323.000 \text{ Kcal} \\ \text{CO} + \text{N}_2 &= 38000 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 8'442.840 \text{ "} \\ \text{CO}_2 &= 4000 \times (0.406 + 9.0 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 1'313.200 \text{ "} \\ \text{H}_2\text{O} &= 2000 \times (0.373 + 5.0 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 571.200 \text{ "} \\ &= 11'650.240 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

$$\text{Calor utilizado en precalentamientos} = 11'650.240 + 11'743.768 = 23'394.008 \text{ Kcal}$$

$$\text{Eficiencia de los regeneradores} = 23'394.008 / 54'404.574 = 0.43$$

$$\text{Eficiencia de los regeneradores} = 43.0\% (18-5)$$

EJERCICIO N°19 (7)

Un horno de hogar abierto es cargado primero con 40 toneladas de chatarra que contiene $0.8\% \text{C}$, $1.0\% \text{Si}$, $0.3\% \text{Mn}$, $0.05\% \text{P}$. Dos horas después, se agregan 50 toneladas de arrabio fundido, el cual contiene $4.0\% \text{C}$, $1.0\% \text{Si}$, $1.5\% \text{Mn}$, $0.26\% \text{P}$.

Justo antes de que el arrabio sea adicionado, se han oxidado por los gases del horno dos tercios del Si y el Mn de la chatarra además, un octavo del Fe en la chatarra se ha transformado a FeO .

Junto con el arrabio se adicionan, mineral que contiene 75% Fe_2O_3 , 13% SiO_2 , 12% MnO y suficiente CaCO_3 como para producir una escoria con 42% CaO

El FeO formado a partir de la chatarra reacciona ahora con las impurezas del arrabio suministrando oxígeno para oxidarlas en parte, y se autoreduce a Fe

A partir de mineral se forma suficiente FeO como para producir una escoria final con 20% FeO ; el resto del Fe_2O_3 del mineral es reducido a Fe

El baño, justo antes de la colada, contendrá 75% del Mn contenido en la chatarra y el arrabio como Mn residual. Contendrá también C equivalente a, 0,5% del peso total del arrabio y la chatarra cargados.

Se utiliza suficiente mineral para oxidar todo el balance de las impurezas (asumiendo que el $\text{C} \rightarrow \text{CO}$), después del permitido para la acción del FeO reseñado arriba

PREGUNTAS

1. El peso del mineral adicionado
2. El peso del CaCO_3 utilizado
3. La composición de la escoria
4. la composición del acero (antes de la recarburación)

SOLUCION

Para este cálculo, comparamos el oxígeno aportado por el gas y el aportado por el mineral para la oxidación de las impurezas, el cual a su vez proviene del Fe_2O_3

Carga conocida

Chatarra = $40 \times 1000 = 40000$ Kilogramos

$\text{C} = 40000 \times 0,005 = 200$
 $\text{Si} = 40000 \times 0,001 = 40$
 $\text{Mn} = 40000 \times 0,003 = 120$
 $\text{P} = 40000 \times 0,0005 = 20$
 $\text{Fe} = 40000 \times 0,9905 = 39620$

Arrabio = $50 \times 1000 = 50000$ kilogramos

$\text{C} = 50000 \times 0,04 = 2000$
 $\text{Si} = 50000 \times 0,01 = 500$
 $\text{Mn} = 50000 \times 0,015 = 750$
 $\text{P} = 50000 \times 0,0026 = 130$
 $\text{Fe} = 50000 \times 0,9324 = 46620$

$\text{C cargado} = 200 + 2000 = 2200 \text{ Kg}$
 $\text{C en baño} = (40000 + 50000) \times 0,005 = 450$
 $\text{C oxidado} = 2200 - 450 = 1750$

$\text{Mn cargado (arrabio + chatarra)} = 120 + 750 = 870 \text{ Kg}$
 $\text{Mn oxidado} = 870 \times 0,75 = 652,5$

$\text{Si oxidado} = 40 + 500 = 540 \text{ Kg}$

$\text{P oxidado} = 20 + 130 = 150 \text{ Kg}$

$\text{O del C} = 1750 \times 16/12 = 2333,3 \text{ Kg}$
 $\text{O del Mn} = 625,5 \times 16/55 = 189,8 \text{ Kg}$
 $2/3 \text{ Mn en chatarra} = 120 \times 2/3 = 80$
 $\text{O de este} = 80 \times 16/55 = 23,3$
 $\text{O del Mn, proveniente del mineral} = 189,8 - 23,3 = 166,5 \text{ Kg}$

$O \text{ del Si} = 540 \times 32/28 = 617,1 \text{ Kg}$
 $2/3 \text{ Si en chatarra} = 40 \times 2/3 = 26,7 \text{ Kg}$
 $O \text{ de este} = 26,7 \times 32/28 = 30,5 \text{ Kg}$
 $O \text{ del Si, proveniente del mineral} = 617,1 - 30,5 = 586,6 \text{ Kg}$

$O \text{ del P} = 150 \times 80/62 = 193,5 \text{ Kg}$

$O \text{ total del mineral (sin el del FeO)} = 2333,3 + 166,5 + 586,6 - 193,5 = 3279,9 = 3280 \text{ Kg}$

$\text{Fe en chatarra} \rightarrow \text{FeO al principio} = 39620 \times 1/8 = 4952,5 \text{ Kg}$
 $O \text{ de este} = 4952,5 \times 16/56 = 1415 \text{ Kg}$

Sea $X = \text{peso del mineral}$

$\text{SiO}_2 \text{ formado} = 540 + 617,1 = 1157,1 \text{ Kg}$
 $\text{MnO formado} = 652,5 + 189,8 = 842,3 \text{ Kg}$
 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ formado} = 150 + 189,8 = 343,5 \text{ Kg}$
 2342,9 Kg.

$\text{SiO}_2 \text{ y MnO del mineral} = 0,13X + 0,12X = 0,25X$

$\text{Escoria} = \text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5$
 $\text{CaO} + \text{FeO} = 42 + 20 = 62\% \text{ de la escoria}$
 $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{MnO} + \text{SiO}_2 = 100 - 62 = 38\% \text{ de la escoria}$

$2342,9 + 0,25X = 38\% \text{ de la escoria}$

$\text{FeO} = 20\% \text{ de la escoria}$
 $\text{FeO en escoria} = (2342,9 + 0,25X) \times 20/38 = 1233,1 + 0,1316X$
 $O \text{ de este} = (1233,1 + 0,1316X) \times 16/72 = 274,0 + 0,0292X$

$O \text{ de FeO para reducir impurezas} = 1415 - 274 - 0,0292X = 1141 - 0,0292X$

$O \text{ suministrado por el mineral} = 3280 - (1141 - 0,0292X) = 2139 + 0,0292X$

Del análisis del mineral obtenemos

$O \text{ del Fe}_2\text{O}_3 = 0,75X \times 48/160 = 0,225X$

$2139 + 0,0292X = 0,225X$

$X = 10924,4 \text{ Kg}$

Peso del mineral adicionado = 10924,4 Kg. (19-1)

$2342,9 + 0,25X = 38\% \text{ de la escoria}$
 $\text{Escoria} = (2342,9 + 0,25 \times 10924,4)/0,38 = 13352,6 \text{ Kg.}$

$\text{CaO} = 13352,6 \times 0,42 = 5608,1 \text{ Kg.}$

$\text{CaCO}_3 = 5608,1 \times 100/56 = 10014,5 \text{ Kg}$
 $\text{CaCO}_3 \text{ utilizado} = 10014,5 \text{ Kg. (19-2)}$

$\text{Escoria} = \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{CaO} + \text{P}_2\text{O}_5$

Composicion de la escoria. (19-3)

$\text{SiO}_2 = 1157,1 + 0,13 \times 10924,4$	$= 2577,3 \text{ Kg}$	$19,3\%$
$\text{MnO} = 652,5 + 189,8 + 0,12 \times 10924,4$	$= 2153,2 \text{ Kg}$	$16,1\%$
$\text{FeO} = 1233,1 + 0,1316 \times 10924,4$	$= 2670,7 \text{ Kg}$	$20,0\%$
CaO	$= 5608,1 \text{ Kg}$	$42,0\%$
P_2O_5	$= 343,5 \text{ Kg}$	$2,6\%$
	$13352,8 \text{ Kg}$	$100,0\%$

4

Acero = Fe + C + Mn

Fe cargado = $39620 + 46620 + 10924,4 \times 0,75 \times 112/160 = 91975,3 \text{ Kg}$ Fe en escoria = $2670,7 \times 56/72 = 2077,2 \text{ Kg}$ Fe en arrabio = $91975,3 - 2077,2 = 89898,1 \text{ Kg}$ Mn en acero = $(120 + 750) \times 0,25 = 217,5 \text{ Kg}$ C en acero = $(40000 + 50000) \times 0,005 = 450 \text{ Kg}$

Composición del acero antes de la recarburación: (19-4)

Fe	=	89898,1 Kg.	=	99,26%
Mn	=	217,5 Kg.	=	0,24%
C	=	450,0 Kg.	=	0,50%
		90565,6 Kg.		100,00%

EJERCICIO N°20 (7)

Un horno eléctrico, mientras se prepara para la colada, utiliza 1000 Kw. y de estos requiere 400 kw. para mantener la carga de 10 toneladas de acero a la temperatura de colada

El calor requerido para elevar 1 kilogramo de acero al punto de fusión es 250 kilocalorías para fundir el acero, 50 kilocalorías. Asumir una pérdida de calor un 10% en el transcurso de la operación

El punto de fusión del acero es 1500°C

El calor específico del acero fundido es 0,20

El tiempo total de la operación es de 8 horas. Durante el tiempo siguiente a la fusión mientras la carga está siendo desoxidada, liberada de escorias y colada la temperatura se mantiene constante e igual a la temperatura de colada, 1700°C

PREGUNTAS

1. El tiempo requerido para calentar la carga a la temperatura de fusión
2. El tiempo requerido para fundir la carga
3. El tiempo requerido para sobre calentar la carga
4. La eficiencia electrotérmica de la operación global
5. El tiempo total requerido, y la eficiencia, si se utilizan 1500 Kw. mientras se calienta al punto de fusión

SOLUCION

Calor requerido para elevar la carga al punto de fusión = $10000 \times 250 = 2.500.000 \text{ Kca.}$

Para ponerse a punto para la colada, requiere 1000 Kw

Para mantener la carga a la temperatura de colada se requieren 400 Kw

Para llegar al punto de fusión se requieren $1000 - 400 = 600 \text{ Kw}$

1 Kw-hr \rightarrow 860 Kca

$$X \rightarrow 2\,500\,000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Kw-hr} = 2\,500\,000 / 860 = 2907$$

$$t = 2907 \text{ Kw-hr} / 600 \text{ Kw} = 4,85 \text{ hr}$$

Tiempo requerido para llevar la carga al punto de fusión = 4,85 horas (20-1)

$$\text{Calor requerido para fundir el acero} = 10000 \times 50 = 500000 \text{ Kcal}$$

Dado que las pérdidas son un formes en toda la operación podemos utilizar la siguiente regla de tres

$$\begin{array}{ll} 2\,500\,000 \text{ Kcal.} & \rightarrow 4,85 \text{ hr} \\ 500\,000 & \rightarrow X \end{array}$$

$$X = 4,85 \times (500000 / 2\,500000) = 0,97$$

Tiempo requerido para fundir la carga = 0,97 horas (20-2)

El sobrecalentamiento consiste en elevar el acero fundido, desde 1500°C hasta 1700°C , es decir, una elevación de temperatura de 200°C

$$\text{Calor debido al sobrecalentamiento} = 10000 \times 0,2 \times 200 = 400000 \text{ Kcal.}$$

Con una regla de tres parecida a la anterior

$$X = 4,85 \times (400000 / 2\,500\,000) = 0,776 \approx 0,78$$

Tiempo para sobrecalentar la carga = 0,78 horas. (20-3)

El contenido de calor necesario para mantener el acero a 1700°C , será $400000 \text{ Kcal} = 10000 \times 0,2 \times 200$

$$\text{Calor total de la operación} = 2\,500\,000 + 500000 + 400000 + 400000 = 3\,800\,000 \text{ Kcal}$$

$$\text{Eficiencia} = 3\,800\,000 / 1000 \times 8 \times 860 = 0,552$$

Eficiencia electrotérmica de la operación = 55,2% (20-4)

Se utilizan 1500 Kw hasta que se llega al punto de fusión, el tiempo utilizado para esta etapa

$$t = 2\,500\,000 / [(1500 - 400) \times 860] = 2,64 \text{ hr}$$

$$\text{Tiempo total} = 8 - 4,85 + 2,64 = 5,79 \text{ hr}$$

Tiempo total de la operación = 5,79 horas (20-5)

Dado que para el calentamiento por encima de punto de fusión y para el mantenimiento a la temperatura de colada, en ambos casos, los tiempos y la energía consumida siguen siendo los mismos, para el cálculo de la eficiencia, promediamos la energía así

$$(1100 + 600) / 2 + 400 = (1500 + 1000) / 2 = 1250 \text{ Kw}$$

$$\text{Eficiencia} = 3\,800\,000 / 1250 \times 5,79 \times 860 = 0,611$$

Eficiencia = 61,1% (20-5)

EJERCICIO N°21 (7)

Un horno eléctrico utiliza 20000 amperios y 75 voltios, con un factor de potencia de 0.80. Se calientan 6000 kilogramos de acero desde 0 °C hasta su punto de fusión de 1500°C en 2 horas. En el instante en que se termina la fusión, cada kilogramo de acero contiene 290 kilocalorías.

El calor latente de fusión es 51 kilocalorías.

El calor específico del acero fundido es 0,21.

Después de la fusión, el acero es sobrecalentado a 1680°C para la colada.

Assumir que la rata de calor perdido durante cualquier periodo, es proporcional a la temperatura media durante dicho periodo.

PREGUNTAS

1. La eficiencia térmica promedio del horno, durante el periodo de calentamiento.
2. El tiempo requerido para fundir el acero, y la eficiencia de este periodo.
3. El tiempo requerido para el sobrecalentamiento y la eficiencia durante este periodo.

SOLUCION

1.
Vamos a utilizar las siguientes expresiones:

$$W = E \cdot I \sqrt{3} \cos \phi = 3 \cdot e \cdot i \cos \phi \quad (2)$$

$$Q = 0,00024 I^2 R t = 0,00024 V \cdot I \cdot t \quad (3)$$

Para 1 hora: $Q = 0,00024 \times I^2 \times R \times t = 0,864 V I t$

Donde:

W = potencia eléctrica (W)

E = tensión entre fase y fase = V = voltios.

I = corriente de línea = amperios

$\cos \phi$ = factor de potencia

e = tensión entre fase y neutro (sistema estrella)

i = corriente de fase

Q = calor generado en el circuito eléctrico, Kcal

R = resistencia (Ohm)

t = tiempo

Contenido de calor del acero calentado = $6000 \times 290 = 1'740\,000$ Kcal

Calor aportado = $0,00024 \times 75 \times 20000 \times 2 \times 3600 \times 0,8 = 2'073\,600$ Kcal

Eficiencia = $1'740\,000 / 2'073\,600 = 0,839$

Eficiencia durante el calentamiento = 84% (21-1)

2.

A 1500°C antes de fundir el acero, cada kilogramo de este contiene $290 + 51 = 239$ Kcal.

Debido a que las pérdidas son proporcionales a la temperatura en cada periodo, podemos establecer la siguiente regla de tres:

2 horas \rightarrow 239 Kcal / Kg

X \rightarrow 51

X = tiempo de fusión = $2 \times (51 / 239) = 0,43$

Tiempo requerido para fundir el acero = 0,43 horas. (21-2)

$$\text{Calor requerido} = 6000 \times 75 = 306000 \text{ Kcal}$$

Calor aportado durante la fusión (ecuación #3)

$$0,00024 \times 75 \times 20000 \times 0,43 \times 3600 \times 0,8 = 445824 \text{ Kcal}$$

$$\text{Eficiencia} = 306000 / 445824 = 0,686$$

$$\text{Eficiencia durante el periodo de fusión} = 68,6\% \text{ (21-2)}$$

$$\text{Calor requerido por el sobrecalentamiento} = 6000 \times (1680 - 1500) \times 0,21 = 226800 \text{ Kcal}$$

$$\text{Tiempo para sobrecalentamiento} = 2 \times 226800 / 239 \times 6000 = 0,32$$

$$\text{Tiempo requerido para sobrecalentar el acero} = 0,32 \text{ horas. (21-3)}$$

Calor aportado durante el sobrecalentamiento =

$$2,4 \times 10^{-4} \times 75 \times 20000 \times 0,32 \times 3600 \times 0,8 = 331776 \text{ Kcal}$$

$$\text{Eficiencia} = 226800 / 331776 = 0,683$$

$$\text{Eficiencia durante el periodo de sobrecalentamiento} = 68,3\% \text{ (21-3)}$$

EJERCICIO N°22 (7)

Cierta carbon bituminoso tiene la siguiente composición

C	78%
H	5
O	8
R	8
H ₂ O	1

Este carbon es quemado en un horno con el objeto de calentar lingotes de acero ductil para forja. Asumir que solamente se utiliza en la combustion, la cantidad de aire teorico. Los productos de combustion salen del horno a 1000°C. Por cada 1000 kilogramos de carbon quemado, se calientan 1000 kilogramos de lingotes a 1000°C, en 1 hora.

PREGUNTAS

1. El porcentaje de la potencia calorifica del carbon, perdido en las chimeneas.
2. El porcentaje de la potencia calorifica del carbon, utilizado en el calentamiento de los lingotes.
3. Cuanta potencia electrica sera requerida para calentar los mismos lingotes, asumiendo el mismo calor por radiación y conducción del horno, por hora, que cuando se quemó el carbon.
4. Cuanta potencia electrica seria requerida solo para mantener los lingotes a 1000°C, despues de que ellos han sido calentados a esa temperatura?

SOLUCION

Reacciones de combustion

$$\begin{aligned} \text{C} + \text{O}_2 &= \text{CO}_2 & \text{O}_2 &= 780 \times 22,4 / 12 = 1456 \text{ m}^3 \\ 2\text{H}_2 + \text{O}_2 &= 2\text{H}_2\text{O} & \text{O}_2 &= 50 \times 22,4 / 4 = 280 \text{ m}^3 \\ & & & 1736 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{O}_2 \text{ teorico} = 736 \cdot 80 \times 22,4 / 32 = 1680 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teorico} = 1680 / 0,21 = 8000 \text{ m}^3$$

Productos de combustion: $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

$$\begin{aligned}
 N_2 &= 8000 \times 0,79 &= 6320 \text{ m} \\
 CO_2 & &= 1456 \text{ m}^3 \\
 H_2O &= 280 \times 2 + 10 \times 22,4/18 = \frac{572 \text{ m}^3}{8348 \text{ m}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P.C.B \text{ del carbón} &= 8100C + 34000 \times (H - O/8) - 2200S - 586 \times (9H + W) \\
 P.C.B \text{ del carbón} &= 8100 \times 780 + 34000 \times (50 - 80/8) + 0 - 586 \times (9 \times 10 + 10) \\
 &= 7'408.440 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Calor sacado por los gases productos de la combustión

$$\begin{aligned}
 N &= 6320 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 2'047.680 \text{ Kcal} \\
 H_2O &= 572 \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 241.956 \text{ Kcal} \\
 CO_2 &= 1456 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = \frac{722.178 \text{ Kcal}}{3'011.812 \text{ Kcal}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Calor perdido en gases} &= 3'011.812 / 7'408.440 = 0,406 \\
 \text{Pérdidas en las chimeneas} &= 40,6\% \text{ (22-1)}
 \end{aligned}$$

2.
Consideremos al lingote como Fe puro y apliquemos los calores específicos que aparecen en la Tabla XIV del Apéndice

Calentamiento del lingote

$$\begin{aligned}
 \text{De } 0^\circ \text{ a } 600^\circ\text{C} &= 10000 \times (0,104 + 0,000064 \times 600) \times 600 = 654.400 \text{ Kcal} \\
 \text{De } 600^\circ \text{ a } 760^\circ\text{C} &= 10000 \times [0,18 + 0,0003 \times (760 - 600)] \times 160 = 364.800 \text{ Kcal} \\
 \text{De } 760^\circ \text{ a } 910^\circ\text{C} &= 10000 \times [0,32 + 0,00057 \times (910 - 760)] \times 150 = 360.750 \text{ Kcal} \\
 \text{De } 910^\circ \text{ a } 1000^\circ\text{C} &= 10000 \times [0,16 + 0,00001 \times (1000 - 910)] \times 90 = 144.810 \text{ Kcal} \\
 &= 1'724.760 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Calor para calentamiento del lingote} &= 1'724.760 / 7'408.440 = 0,233 \\
 \text{Calor para calentamiento del lingote} &= 23,3\% \text{ (22-2)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3. \\
 \text{Calor neto} &= 7'408.440 - 3'011.812 = 4'396.628 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

$$1 \text{ Kw-hr.} = 860 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia eléctrica} &= 4'396.628 / 860 = 5112 \text{ Kw} \\
 \text{Potencia eléctrica} &= 5112 \text{ Kw (22-3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4. \\
 \text{Calorías netas que se necesitan para que los lingotes se mantengan a } 1000^\circ\text{C} \\
 4'396.628 - 1'724.760 &= 2'671.868 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Con estas calorías, el lingote se mantendrá a 1000°C

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia eléctrica} &= 2'671.868 / 860 = 3107 \text{ Kw} \\
 \text{Potencia eléctrica} &= 3107 \text{ Kw. (22-4)}
 \end{aligned}$$

EJERCICIO N°23 (7)

En el primer (refinación) periodo, un horno eléctrico basco para acerar trata toneladas de una carga que contiene la siguiente composición promedia

	2,0%	P	0,8%
Mn	0,8	S	0,2
Si	1,0	Fe	95,2

El acero final (listo para el super-refinado) debe contener un cuarto del carbono original, la mitad del silicio original, la mitad de manganeso original, pero nada de azufre ni fósforo. La reducción de las impurezas es complementada por la adición de mineral de hierro que contiene 85% Fe_2O_3 y 5% SiO_2 .

La escoria producida contiene hierro igual al 70% del total cargado, todo el cual proviene de la reducción de Fe_2O_3 del mineral a FeO , y contiene también 40% CaO . El manganeso pasa a la escoria como MnO , el silicio como SiO_2 , el fósforo como P_2O_5 , el azufre como CaS y el carbono se oxida a CO .

PREGUNTAS

- 1 El peso del mineral utilizado
- 2 El peso de la escoria producida
- 3 El peso de la cal utilizada
- 4 El peso del acero producido

SOLUCION

1
Carga mineral = $10 \times 1000 = 10000$ kilogramos

$$\begin{aligned}C &= 10000 \times 0,02 = 200 \\ \text{Mn} &= 10000 \times 0,008 = 80 \\ \text{Si (inicial)} &= 10000 \times 0,01 = 100 \\ P &= 10000 \times 0,008 = 80 \\ S &= 10000 \times 0,002 = 10 \\ \text{Fe (inicial)} &= 10000 \times 0,952 = 9520\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C \rightarrow \text{acero} &= 200 \times \frac{1}{4} = 50 \text{ Kg} \\ C \text{ oxidado} &= 200 - 50 = 150 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Mn} \rightarrow \text{acero} &= 80 \times \frac{1}{2} = 40 \text{ Kg} \\ \text{Mn} \rightarrow \text{escoria} &= 80 - 40 = 40 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Si} \rightarrow \text{acero} &= 100 \times \frac{1}{5} = 20 \text{ Kg} \\ \text{Si (original)} \rightarrow \text{SiO}_2 &= 100 - 20 = 80 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\text{O del C} = 150 \times \frac{16}{12} = 200 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned}\text{MnO} &= 40 \times \frac{71}{55} = 51,6 \text{ Kg} \\ \text{O del Mn} &= 51,6 - 40 = 11,6 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{SiO}_2 \text{ inicial} &= 80 \times \frac{60}{28} = 171,4 \text{ Kg} \\ \text{O de este} &= 171,4 - 80 = 91,4 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{P}_2\text{O}_5 &= 80 \times \frac{142}{62} = 183,2 \text{ Kg} \\ \text{O de este} &= 183,2 - 80 = 103,2 \text{ Kg}\end{aligned}$$

$$\text{CaS} = 20 \times \frac{72}{32} = 45 \text{ Kg}$$

Sea X = peso del mineral

$$\begin{aligned}\text{Fe en Fe}_2\text{O}_3 &= 0,85X \times \frac{112}{160} = 0,595X \\ \text{Fe total} &= 0,595X + 9520\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fe} \rightarrow \text{FeO} &= (0,595X + 9520) \times 0,02 = 0,0119X + 190,4 \\ \text{FeO} &= (0,0119X + 190,4) \times 72,56 = 0,0153X + 244,8 \\ \text{O total del Fe}_2\text{O}_3 &= 0,85X - 0,595X = 0,255X \\ \text{O del FeO} &= 0,0153X + 244,8 - 0,0119X - 190,4 = 0,0034X + 54,4 \\ \text{O aportado por el Fe}_2\text{O}_3 &= 0,255X - 0,0034X - 54,4 = 0,2516X - 54,4 \\ \text{O para impurezas} &= 200 + 11,6 + 91,4 + 103,2 = 406,2 \text{ Kg.} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{CaO} &= 45 \times 56/72 = 35 \text{ Kg} \\ \text{O de este} &= 35 \times 16/56 = 10 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{O para impurezas} - \text{O aportado por el CaO} = 406,2 - 10 = 396,2 \text{ Kg}$$

$$396,2 = 0,2516X - 54,4$$

$$X = 1791 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del mineral} = 1791 \text{ Kg. (23-1)}$$

$$\begin{aligned} \text{Escoria} &= \text{FeO} + \text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{CaS} + \text{CaO} \end{aligned}$$

$$\text{FeO} = 0,0153 \times 1791 + 244,8 = 272,20 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 = 0,15 \times 1791 + 171,43 = 440,48 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria sin CaO} - 60\% = 272,20 + 440,48 + 51,64 + 183,33 + 45 = 992,25 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 992,25/0,6 = 1653,75 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 1653,75 \text{ Kg. (23-2)}$$

$$\begin{aligned} \text{CaO en escoria} &= 1653,75 \times 0,4 = 661,5 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{CaO} \rightarrow \text{CaS} = 10 + 25 = 35 \text{ Kg}$$

$$\text{Total CaO} = 661,5 + 35 = 696,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso de la cal utilizada} = 696,5 \text{ Kg. (23-3)}$$

$$\begin{aligned} \text{Acero} &= \text{Fe} + \text{Mn} + \text{Si} + \text{C} \end{aligned}$$

$$\text{Fe total cargado} = 9520 + 0,595 \times 1791 = 10585,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{acero} = 10585,6 \times 0,98 = 10373,9 \text{ Kg}$$

$$\text{Acero} = 10373,9 + 40 + 20 + 50 = 10484 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del acero producido} = 10484 \text{ Kg. (23-4)}$$

EFJERCICIO N°24 (7)

El horno eléctrico es cargado con 4 toneladas de chatarra de acero y 4 toneladas de arrabio.

Durante el calentamiento se adicionan 600 kilogramos de mineral de hierro, y suficiente CaCO_3 como para producir una escoria con 40%CaO.

Como desoxidantes se añaden 80 kilogramos de ferrosilicio y 30 kg de ferrosilicio.

Se producen, listos para el super refinado, 7960 kilogramos de acero que contiene 0,3% C; 0,2% Mn; 0,1% Si; 0,02% P y 99,38% Fe.

El análisis de los materiales utilizados fue el siguiente:

	Chatarra de acero	Arrabio	Ferro-Manganeso	Ferro-Silicio	Mineral de hierro	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Fe	99.00	92.0	12	50	Fe ₂ O ₃	80
C	1.50	1.0	6		MnO	4
Mn	0.30	0.8	80		SiO ₂	16
Si	0.12	1.3	2	50		
P	0.18	2.0				

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas del horno
2. La composición de la escoria

SOLUCION

El balance de cargas del horno aparece a continuación, y está basado en los cálculos que aparecen más abajo

BALANCE DE CARGAS (24-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		Acero		Escoria		Gases	
Chatarra = 4000							
Fe	3960	Fe	3960				
C	20	C	20				
Mn	12	Mn	12				
Si	48			Si	48		
P	32	P	1592	P	1608		
Arrabio = 4000							
Fe	3680	Fe	3680				
C	160	C	388			C	156.12
Mn	32	Mn	392	Mn	28.08		
Si	48	Si	796	Si	40.4		
P	80			P	80		
Ferromanganeso = 80							
Fe	96	Fe	96				
Si	4.8					C	4.8
Mn	64			Mn	64		
Si	1.6			Si	1.6		
Ferrosilicio = 36							
Fe	18	Fe	18				
Si	18			Si	18		
Mineral de Fe = 600							
FeO	480	Fe	243.048	FeO	119.51	O	117.44
MnO	24			MnO	24		
SiO ₂	96			SiO ₂	96		
CaCO₃ = 813.55							
CaO	455.59			CaO	455.59		
CO ₂	357.96					CO ₂	357.96
Aire = 1305.36							
N	102.57					N	1002.57
O	302.86					O	302.86
Totales	10834.91		7960		933.228		1941.75

Distribución de la carga (Kg.)

Acero = 7960

$$\begin{aligned}C &= 7960 \times 0,003 = 23,88 \\Mn &= 7960 \times 0,002 = 15,92 \\Si &= 7960 \times 0,001 = 7,96 \\P &= 7960 \times 0,0002 = 1,592 \\Fe &= 7960 \times 0,9938 = 7910,648\end{aligned}$$

Chatarra = 4000

$$\begin{aligned}Fe &= 4000 \times 0,99 = 3960 \\C &= 4000 \times 0,005 = 20 \\Mn &= 4000 \times 0,003 = 12 \\Si &= 4000 \times 0,0012 = 4,8 \\P &= 4000 \times 0,0008 = 3,2\end{aligned}$$

Arrabio = 4000

$$\begin{aligned}Fe &= 4000 \times 0,92 = 3680 \\C &= 4000 \times 0,04 = 160 \\Mn &= 4000 \times 0,008 = 32 \\Si &= 4000 \times 0,012 = 48 \\P &= 4000 \times 0,02 = 80\end{aligned}$$

Ferroalmanganeseo = 80

$$\begin{aligned}Fe &= 80 \times 0,12 = 9,6 \\C &= 80 \times 0,06 = 4,8 \\Mn &= 80 \times 0,80 = 64 \\Si &= 80 \times 0,02 = 1,6\end{aligned}$$

Ferro-silicio = 36

$$\begin{aligned}Fe &= 36 \times 0,5 = 18 \\Si &= 36 \times 0,5 = 18\end{aligned}$$

Mineral de Fe = 600

$$\begin{aligned}Fe_2O_3 &= 600 \times 0,8 = 480 \\MnO &= 600 \times 0,04 = 24 \\SiO_2 &= 600 \times 0,16 = 96\end{aligned}$$

Destino de los componentes de la carga

$$\begin{aligned}C \rightarrow CO &= 20 + 160 + 4,8 - 23,88 = 160,92 \text{ Kg} \\O \text{ de este} &= 160,92 \times 16/12 = 214,56\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mn \rightarrow MnO &= 12 + 32 + 64 - 15,92 = 92,08 \text{ Kg} \\O \text{ de este} &= 92,08 \times 16/55 = 26,79 \\MnO \text{ formado} &= 92,08 + 26,79 = 118,87 \\MnO \text{ a escoria} &= 118,87 + 24 = 142,87\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Si \rightarrow SiO_2 &= 4,8 + 48 + 1,6 + 18 - 7,96 = 64,44 \text{ Kg} \\O \text{ para este} &= 64,44 \times 32/28 = 73,56 \\SiO_2 \text{ formado} &= 73,56 + 64,44 = 138,00 \\SiO_2 \text{ a escoria} &= 138,00 + 96 = 234,00\end{aligned}$$

$$P \rightarrow P_2O_5 = 3,2 + 80 - 1,592 = 81,608 \text{ Kg}$$

$$P_{\text{en la escoria}} = 301 + 81,608 + 186,91$$

$$\text{Fe (chatarra + arrabio + Fe-Mn + Fe-Si)} = 3960 + 3680 + 9,6 + 18 = 7667,6 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe requerido del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 7910,648 - 7667,6 = 243,048$$

$$\text{Fe del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 480 \times 112/160 = 336$$

$$\text{Fe del } \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{FeO} = 336 - 243,05 = 92,95$$

$$\text{FeO a escoria} = 92,95 \times 72/56 = 119,51$$

$$\text{O de este} = 119,51 - 92,95 = 26,56$$

$$\text{O del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 480 - 336 = 144$$

$$\text{O aportado por } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 144 - 26,56 = 117,44$$

$$\text{O total para oxidacion de impurezas} = 214,56 + 26,79 + 73,65 + 105,30 = 420,3 \text{ Kg}$$

$$\text{O aportado por el aire} = 420,3 - 117,44 = 302,86$$

$$\text{N del aire} = 302,86 \times 76,8/23,2 = 1002,57$$

$$\text{Aire} = 1002,57 + 302,86 = 1305,36 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria} = \text{CaO} + \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{FeO}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 60\% = 142,87 + 234,09 + 186,91 + 119,51 = 683,38 \text{ Kg}$$

$$\text{Escoria total} = 683,38/0,6 = 1138,97 \text{ Kg}$$

$$\text{CaO} = 1138,97 - 683,38 = 455,59$$

$$\text{CO}_2 \text{ del } \text{CaCO}_3 = 455,59 \times 44/56 = 357,96$$

$$\text{CaCO}_3 = 455,59 - 357,96 = 97,63 \text{ Kg}$$

Con los calculos anteriores, se estructura el balance de las cargas del horno.

2

Composición de la escoria (24-2)

MnO	=	142,87 Kg.	=	12,54%
SiO ₂	=	234,09 Kg.	=	20,56%
P ₂ O ₅	=	186,91 Kg.	=	16,41%
FeO	=	119,51 Kg.	=	10,49%
CaO	=	455,59 Kg.	=	40,00%
		1138,97 Kg.		100,00%

EJERCICIO N°25 (7)

Un horno eléctrico, revestimiento básico, produce 10 toneladas métricas de acero a partir de la siguiente carga

Chatarra de acero	7000 Kg
Arrabio	3000 Kg.
Cal	200 Kg

Durante el calentamiento se utiliza como fundente 1000 kilogramos de escamas de magnesio y suficiente cal como para producir una escoria con 42% CaO y al final, para recarburar y desoxidar, 100 kilogramos de ferromanganeso y 50 kilogramos de ferrosilicio

El consumo de electrodos es de 100 kilogramos

El acero final contiene 98,9%Fe; 0,2%Mn; 0,6%C; 0,07%P; 0,2%Si y 0,03%S

La chatarra de acero contiene 99,1%Fe; 0,2%Mn; 0,4%C; 0,08%P; 0,15%Si y 0,07%S

La cal es CaO puro

Los reactivos del molino son Fe₂O₃ puro

Ferromanganeso: 13%Fe, 5%C, 2%Si, 80%Mn

Ferrosilicio: 48%Fe, 2%C, 50%Si

Electrodos: 95%C, 5%SiO₂

Arrabio: 92,5%Fe, 4%C, 1%Mn, 1%Si, 1,3%P, 0,2%S

Contenido de calor en la escoria fundida = 500 Kcal/Kg

Contenido de calor en el acero fundido = 325 Kcal/Kg

Potencia utilizada = 1500 Kw, para 5 horas

PREGUNTAS

- 1 El peso de la cal adicionada como fundente, durante el calentamiento
- 2 El peso y la composicion de la escoria
- 3 La eficiencia térmica del horno

SOLUCION

1

Acero final = 10000 Kg.

$$\text{Fe} = 0,989 \times 10000 = 9890$$

$$\text{C} = 0,006 \times 10000 = 60$$

$$\text{Si} = 0,002 \times 10000 = 20$$

$$\text{Mn} = 0,002 \times 10000 = 20$$

$$\text{P} = 0,0007 \times 10000 = 7$$

$$\text{S} = 0,0003 \times 10000 = 3$$

Carga

Chatarra = 7000 Kg.

$$\text{Fe} = 0,991 \times 7000 = 6937$$

$$\text{C} = 0,004 \times 7000 = 28$$

$$\text{Si} = 0,0015 \times 7000 = 10,5$$

$$\text{Mn} = 0,002 \times 7000 = 14$$

$$\text{P} = 0,0008 \times 7000 = 5,6$$

$$\text{S} = 0,0007 \times 7000 = 4,9$$

Arrabio = 3000 Kg.

$$\text{Fe} = 0,925 \times 3000 = 2775$$

$$\text{C} = 0,04 \times 3000 = 120$$

$$\text{Si} = 0,01 \times 3000 = 30$$

$$\text{Mn} = 0,01 \times 3000 = 30$$

$$\text{P} = 0,013 \times 3000 = 39$$

$$\text{S} = 0,002 \times 3000 = 6$$

Ferromanganeso = 100 Kg.

$$\text{Fe} = 0,13 \times 100 = 13$$

$$\text{C} = 0,05 \times 100 = 5$$

$$\text{Si} = 0,02 \times 100 = 2$$

$$\text{Mn} = 0,80 \times 100 = 80$$

Ferrosilicio = 50 Kg.

$$\text{Fe} = 0,48 \times 50 = 24$$

$$S_1 = 0,05 \times 100 = 5$$

electodos consumidos = 100 Kg

$$C = 0,95 \times 100 = 95$$

$$SiO_2 = 0,05 \times 100 = 5$$

$$\text{Escoria} = SiO_2 + FeO + MnO + P_2O_5 + CaS + CaO$$

$$58\% \text{ de escoria} = FeO + SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaS$$

$$Si \text{ cargado} = 10,5 + 30 \cdot 2 \cdot 25 = 67,5 \text{ Kg}$$

$$Si \rightarrow SiO_2 = 67,5 - 20 = 47,5 \text{ Kg}$$

$$SiO_2 \text{ formado} = 47,5 \times 60/28 = 101,8 \text{ Kg}$$

$$SiO_2 \text{ a escoria} = 101,8 + 5 = 106,8 \text{ Kg}$$

$$Fe \text{ cargado} = 6937 + 2775 + 13 + 24 = 9749 \text{ Kg}$$

$$Fe \text{ en } Fe_2O_3 = 1000 \times 168/232 = 724,1 \text{ Kg}$$

$$Fe \text{ total cargado} = 9749 + 724,1 = 10473,1 \text{ Kg}$$

$$Fe \rightarrow FeO = 10473,1 - 9890 = 583,1 \text{ Kg}$$

$$FeO \text{ a escoria} = 583,1 \times 72/56 = 749,7 \text{ Kg}$$

$$Mn \text{ cargado} = 14 + 30 + 80 = 124 \text{ Kg}$$

$$Mn \rightarrow MnO = 124 - 20 = 104 \text{ Kg}$$

$$MnO \text{ a escoria} = 104 \times 71/55 = 134,3 \text{ Kg}$$

$$P \text{ cargado} = 5,6 + 39 = 44,6 \text{ Kg}$$

$$P \rightarrow P_2O_5 = 44,6 - 7 = 37,6 \text{ Kg}$$

$$P_2O_5 \text{ a escoria} = 37,6 \times 142/62 = 86,1 \text{ Kg}$$

$$S \text{ cargado} = 4,9 + 6 = 10,9 \text{ Kg}$$

$$S \rightarrow CaS = 10,9 - 3 = 7,9 \text{ Kg}$$

$$CaS \text{ a escoria} = 7,9 \times 72/32 = 17,8 \text{ Kg}$$

Sea X = peso de la escoria

$$0,58X = 106,8 + 749,7 + 134,3 + 86,1 + 17,8 = 1094,7 \text{ Kg}$$

$$CaO \text{ en escoria} = 1094,7 \times 42/58 = 792,7 \text{ Kg}$$

$$Ca \text{ en } CaS = 17,8 - 7,9 = 9,9 \text{ Kg}$$

$$CaO \text{ correspondiente} = 9,9 \times 56/40 = 13,9 \text{ Kg}$$

$$CaO \text{ adicionado como fundente} = 792,7 + 13,9 \cdot 200 = 606,6 \approx 607 \text{ Kg}$$

$$CaO \text{ adicionado como fundente} = 607 \text{ Kg. (25-1)}$$

Peso y composición de la escoria (25-2)

SiO ₂	=	106,8 Kg.	=	5,6%
FeO	=	749,7 Kg.	=	39,7%
MnO	=	134,3 Kg.	=	7,1%
P ₂ O ₅	=	86,1 Kg.	=	4,6%
CaS	=	17,8 Kg.	=	1,0%
CaO	=	792,7 Kg.	=	42,0%
Total escoria	=	1887,4 Kg.	=	100,0%

3

Calor en la escoria fundida = $1887.4 \times 500 = 943.700 \text{ Kcal}$ Calor en el acero fundido = $325 \times 10000 = 3.250.000 \text{ Kcal}$ Calor útil = $4.193.700 \text{ Kcal}$ Potencia de operación = $1500 \times 5 \times 860 = 6.450.000 \text{ Kcal}$ Eficiencia = $4.193.700 / 6.450.000 = 0,65$

Eficiencia térmica del horno = 65,0% (25-3)

EJERCICIO N°26 (7)

En un horno eléctrico de arco se trataron 18 toneladas de chatarra de acero inoxidable (18%Cr, 8%Ni, 0,2%Si, 0,03%S) y 6 toneladas de barras de hierro forjado, conteniendo 0,08%Si y nada de Ni, Cr ni Si. La escoria al final del periodo de fusión pesó 1000 libras y contenía 0,5%FeO y 1%Cr₂O₃. asumir que solamente este hierro y este cromo fueron tomados de la carga original, el balance de la escoria fue adicionado.

Despreciar la oxidación del C de los electrodos, al igual que cualquier aire que pueda entrar al horno.

PREGUNTAS

1. ¿Cuánto ferrocromo (70%Cr) y cuanto níquel pulverizado (98%Ni), deberían ser agregados a la carga para llevar la composición de baño completo a un contenido de 18%Cr y 8%Ni?

2. ¿Cuántas libras de ferrosilicio (80%Si) deben ser cargadas para reducir todo el FeO a Fe y todo el Cr₂O₃ a Cr, y dejar 0,3%Si en el acero?

3. ¿Cuánto cisco de coque (8%C) será necesario para formar suficiente CaC₂ para reducir el azufre del baño a 0,015%, de acuerdo a la reacción:



también para reducir el contenido de FeO del acero de 0,27 a 0,03%, por reacción del FeO con CaC₂ y dejar la escoria con 1,5%CaC₂?

4. Si 1 tonelada de la misma carga de arriba fuera fundida en un horno de inducción Ajax Northrup de alta frecuencia, donde no se forma CaC₂, ¿cuánto polvo de coque (8%C) sería requerido para desulfurar el acero de acuerdo a la reacción:



También para reducir el contenido de FeO del acero de 0,27 a 0,03%. En este caso permitir un contenido de C en la escoria de 0,5%.

SOLUCION

1.

Chatarra = $18 \times 2000 = 36000 \text{ libras}$ Barra de hierro = $6 \times 2000 = 12000 \text{ libras}$ Cr en chatarra = $36000 \times 0,18 = 6480 \text{ lbs.}$ Cr₂O₃ en escoria = $1000 \times 0,01 = 10 \text{ lbs.}$ Cr en escoria = $10 \times 104/152 = 6,84 \text{ lbs.}$ Ni en chatarra = $36000 \times 0,08 = 2880 \text{ lbs.}$

Sea

X = baño final

Y = ferrocromo

Z = polvo de níquel

En base a las necesidades de cromo y níquel en el baño final y a los contenidos de estos elementos en la carga, vamos a realizar los respectivos balances para el elemento cromo, en un sistema de ecuaciones

Balance parcial para el cromo

$$(1) \quad 0,18X = 6480 + 0,7Y - 6,84 = 6473,16 + 0,7Y$$

Balance parcial para el níquel:

$$(2) \quad 0,08X = 2880 + 0,98Z$$

Como tenemos 2 ecuaciones con 3 incógnitas, debemos establecer una ecuación más

FeO en escoria = $1000 \times 0,005 = 5$ lbs.

Fe de este = $5 \times 56/72 = 3,89$ lbs

Carga inicial = $36000 + 12000 = 48000$ lbs.

De esta: $48000 - 3,89 - 6,84 = 47989,27$ lbs. pasan al baño final.

Balance para el baño final:

$$(3) \quad X = 47989,27 + Y + Z$$

Sistema de ecuaciones:

$$(1) \quad 0,18X = 6473,16 + 0,7Y$$

$$(2) \quad 0,08X = 2880 + 0,98Z$$

$$(3) \quad X = 47989,27 + Y + Z$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, encontramos

X = baño final = 54140,53 lbs.

Y = Fe-Cr. = 4674,5 lbs.

Z = Polvo de Ni. = 1481 lbs.

Ferrocromo a agregar = 4674,5 lbs. (26-1)

Ni. Pulverulento a adicionar = 1481 lbs. (26-1)

2

O del $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 10 - 6,84 = 3,16$ lbs.

O del FeO = $5 - 3,89 = 1,11$ lbs.

O total $\rightarrow \text{SiO}_2 = 3,16 + 1,11 = 4,27$ lbs.

Si requerido = $4,27 \times 28/32 = 3,74$ lbs.

Si original = $36000 \times 0,002 = 72$ lbs.

Sea.

W = Fe-Si.

X = acero

Acero sin Si = $100 - 0,3 = 99,7\%$

$0,997X = 48000 + 4674,5 + 1481 - 72 = 54083,5$

$0,003X = 0,8W - 3,74 + 72 = 0,8W + 68,26$

Sistema de ecuaciones en base al acero y al silicio:

$$(1) \quad 0,997X = 54083,5$$

$$(2) \quad 0,003X = 68,26 + 0,8W$$

Resolviendo el sistema anterior:

X = 54246,2

W = 1481

Ferrosilicio a agregar = 118,2 lbs (26-2)

S.

Baño final = 54246,2 lbs.

S cargado = $36000 \times 0,0003 + 12000 \times 0,00018 = 12,96$ lbs.

El baño debe quedar con S = $54246,2 \times 0,00015 = 8,14$ lbs.

S que debe salir del baño = $12,96 - 8,14 = 4,82$ lbs.

Reaccion



Pesos moleculares: $(\text{Mn.Fe})\text{S} = 143$, $\text{CaC}_2 = 64$

$(\text{Mn.Fe})\text{S} = 4,82 \times 143/32 = 21,54$ lbs.

CaC_2 que reacciona = $21,54 \times 64/3 \times 143 = 3,21$ lbs.

FeO (acero) = $54246,2 \times 0,0027 = 146,46$ lbs.

FeO que debe quedar en el acero = $54246,2 \times 0,0003 = 16,27$ lbs.

FeO que reacciona = $146,46 - 16,27 = 130,19$ lbs.

Reaccion



CaC_2 de esta reacción = $130,19 \times 64/3 \times 72 = 38,57$ lbs.

CaC_2 en escoria = $1000 \times 0,015 = 15$ lbs.

CaC_2 total = $3,21 + 38,57 + 15 = 56,78$ lbs.

Formación del CaC_2 :



$\text{C} = 56,78 \times 3 \times 12/64 = 31,94$ lbs.

Cisco de coque = $31,94/0,85 = 37,6$ lbs.

Cisco de coque necesario = 37,6 lbs. (26-3)

4

Carga inicial

Chatarra = 36000 lbs. ; S = $36000 \times 0,0003 = 10,8$ Lbs.

Barras de Fe = 12000 lbs.; S = $12000 \times 0,00018 = 2,16$ lbs

S total = 12,96 lbs

%S (carga inicial) = $12,96/48000 = 0,00027 = 0,027\%$

Reaccion de desulfuración



S (nueva carga) = $2000 \times 0,00027 = 0,54$ lbs

$(\text{Mn.Fe})\text{S} = 0,54 \times 143/32 = 2,41$ lbs.

C (desulfuración) = $2,41 \times 12/143 = 0,2$ lbs.

Acero inicial = 54140,5 lbs.

Carga total = $48000 + 4674,5 + 1481 = 54155,5$ lbs.

Adiciones nuevas

$$\text{Fe-Cr} = 4674,5 \times 2000/48000 = 194,77 \text{ lbs.}$$

$$\text{Polvo de Ni.} = 1481 \times 2000/28000 = 61,71 \text{ lbs.}$$

$$\text{Carga nueva} = 2000 + 194,77 + 61,71 = 2256,48 \text{ lbs.}$$

$$\text{Acero nuevo} = 54140,5 \times 2256,48/54155,5 = 2255,85 \text{ lbs.}$$

$$\text{FeO (inicial)} = 2255,85 \times 0,0027 = 6,09 \text{ lbs.}$$

$$\text{FeO que debe quedar} = 2255,85 \times 0,0003 = 0,68 \text{ lbs.}$$

$$\text{FeO que reacciona} = 6,09 - 0,68 = 5,41 \text{ lbs.}$$



$$\text{C} = 5,41 \times 12/72 = 0,90 \text{ lbs.}$$

$$\text{Escoria nueva} = 1000 \times 2000/48000 = 41,7 \text{ lbs.}$$

$$\text{C en escoria} = 41,7 \times 0,005 = 0,21 \text{ lbs.}$$

$$\text{C a adicionar} = 0,2 + 0,9 + 0,21 = 1,31 \text{ lbs.}$$

$$\text{Cisco de coque} = 1,31/0,85 = 1,54 \text{ lbs.}$$

$$\text{Cisro de coque requerido} = 1,54 \text{ lbs (26-4)}$$

CAPITULO IX
PRODUCCION DEL SOPLO
Y
CORRIENTES DE AIRE

EJERCICIO N°1 (7)

El gas de un alto horno presenta el siguiente análisis:

CO	26%	CH ₄	1%
CO ₂	10	H ₂ O	2
H ₂	2	N ₂	59

El horno produce 400 toneladas de arrabe por día y 3900 m³ de gas por tonelada de arrabe. El soplo es precalentado a 600°C en estufas que trabajan con una eficiencia del 65%. El gas sobrante es utilizado en máquinas a gas a una eficiencia termomecánica de 25%. El soplo es comprimido a 1 atmósfera de presión barométrica y a una eficiencia de 85%.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del gas requerido por las estufas.
2. La potencia utilizada en comprimir el soplo.
3. El sobrante de potencia disponible, después de haber sido provistas las estufas y las máquinas de soplado, en kilovatios.

SOLUCION

1.

$$\text{Gas producido} = 400 \times 3900 = 1'560.000 \text{ m}^3/\text{día.}$$

$$\begin{aligned} \text{N}_2 \text{ en gas} &= 1'560.000 \times 0,59 = 920.400 \\ \text{Soplo} &= 920400 / 0,79 = 1'165.063 \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Contenido de calor en el soplo a } 600^\circ\text{C} &= \\ &= 1'165.963 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 600) \times 600 = 220'336.715 \text{ Kcal./día.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{El contenido de calor suministrado por el combustible a las estufas} &= \\ &= 220'336.715 / 0,65 = 338'979.562 \text{ Kcal./día.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Contenido de calor que puede suministrar 1 m}^3 \text{ de gas.} \\ \text{CO} &= 3034 \times 0,26 = 788,84 \text{ Kcal.} \\ \text{H}_2 &= 2582 \times 0,02 = 51,64 \\ \text{CH}_4 &= 8560 \times 0,01 = 85,60 \\ \text{Calor que puede suministrar el gas} &= 926,08 \text{ Kcal./m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 338.979.562 \text{ Kcal.} / 926,08 \text{ Kcal./m}^3 = 366037 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 366037 / 1'560.000 = 0,234$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 23,4\% (1-1)$$

2

Para la solución a esta pregunta vamos a utilizar el *metodo diagramatico*, el cual se apoya en la Figura #1:

La figura 1a, representa un cilindro que contiene un pistón que puede realizar el recorrido AC. Inicialmente el cilindro es llenado con aire no comprimido y el pistón se encuentra en la posición A.

En la figura 1b, representa una grafica de la presión P en el cilindro, contra el cambio de volumen ΔV del cilindro ocupado por el aire a la derecha del pistón.

Cuando el cilindro se encuentra en la posición A, $P = 1$ atmósfera y $\Delta V = 0$.

Supongamos que el cilindro se mueve hacia la derecha hasta alcanzar la posición B, en este caso, el aire resulta comprimido y se encuentra confinado al espacio BC.

Si la temperatura dentro del cilindro no cambia, la presión del aire crecerá en proporción inversa a su volumen, de acuerdo a la ley de Boyle.

Supongamos que el incremento de presión está representado por la recta AB (Fig. 1 b) aunque realmente es una curva.

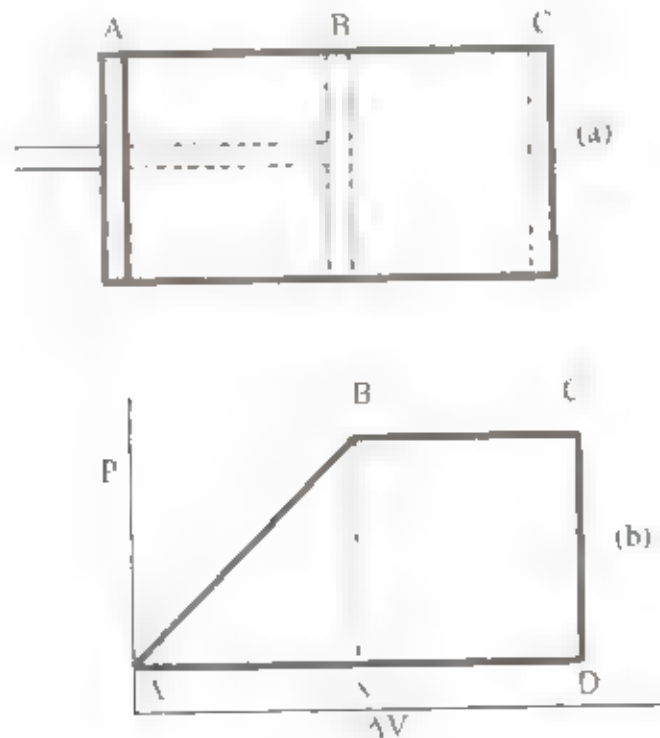


Figura N°1.

Asumamos que en la posición B el aire ha alcanzado la presión deseada, P_1 , y que durante el recorrido BC no existen cambios de presión, lo cual se logra a través de un sistema de válvulas (P será la presión total = presión barométrica + presión atmosférica). Al final del recorrido, se admite aire de nuevo en el cilindro y la presión cae de nuevo a D, = A como para iniciar de nuevo. La caída de presión en este caso = CD.

El trabajo realizado por el pistón es el producto ΔV por la presión actuante. Matemáticamente este trabajo es el área ABCDA, Fig. 1 b, la cual está compuesta por un rectángulo y un triángulo, cuya altura es = presión barométrica = $P_1 - P_0$; siendo P_0 = presión atmosférica.

Para calcular el área, es solamente necesario determinar qué fracción de recorrido total AD corresponde a BC (= xD), la fracción restante del recorrido es Ax = $1 - xD$.

Puesto que la posición B se alcanza durante la compresión, es decir cuando se llega a P_1 y dado que el volumen es inversamente proporcional a la presión, $xD = P_0/P_1$.

Sobre las bases anteriores, tratemos de efectuar el cálculo solicitado.

$$1 \text{ atm.} = 10333 \text{ Kg./m}^2$$

$$1 \text{ Kw} = 102 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$\text{Soplo} = 1'165.063 \text{ (m}^3/\text{día)} \times 1 \text{ día}/24 \text{ hr} \times 1 \text{ hr}/60 \text{ min} \times 1 \text{ min.}/60 \text{ seg.}$$

$$= 3,5 \text{ m}^3/\text{seg.} = V_0$$

$$P_0 = 1 \text{ atm.} = 10333 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Presión barométrica} = 1 \text{ atm.}$$

$$P_1 = 2 \times 10333 = 20666 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Sea } W = \text{área ABCD}$$

$$\text{Área ABCD} = \text{Área ABx} + \text{Área xBCD}$$

$$XD = P_0/P_1 = 10333/20666 = 0,5$$

$$CD = 10333 \text{ Kg./m}^2 = P_0$$

$$\text{Área xBCD} = (xD) \cdot (CD) = 10333 \times 0,5 = 5166,5 \text{ Kg. m}^2$$

$$Ax = 1 \quad xD = 1 - 0,5 = 0,5$$

$$\text{Area ABx} = [(Ax) \cdot (xB = CD)]/2$$

$$\text{Area ABx} = 0,5 \times 10333/2 = 2583,25 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Area total} = \text{ABx} + \text{xBCD} = 2583,25 + 5166,5 = 7749,75 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Potencia} \approx 13,5 (\text{m}^3/\text{seg.}) \times 7749,75 (\text{Kg./m}^2) = 104621,63 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$\text{Potencia requerida} \approx 104621,63 / 102 \approx 1025 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia utilizada} = 1025/0,85 \approx 1205 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia utilizada} = 1205 \text{ Kw. (1-2)}$$

Existe otro método para el cálculo de esta potencia y es con la ayuda de la denominada *formula adiabatica* la cual permite determinar el trabajo realizado en una *compresion adiabatica*.

$$W = \frac{k}{k-1} V_0 P_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1)$$

V_0 volumen del gas antes de la compresion, medido a la presión P_0 , puede representar tambien el volumen por unidad de tiempo, en cuyo caso, la fórmula da la potencia requerida (a 100% de eficiencia mecánica).

$k = C_p/C_v$, para el aire vale 1,408

C_p = calor específico a presión constante.

C_v = " " volumen constante.

Para el aire, la ecuación toma la siguiente forma:

$$W = 3,45 V_0 P_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{0,29} - 1 \right] = \text{potencia} \quad (1)$$

$$V_0 = 13,5 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$P_0 = 10333 \text{ Kg./m}^2$$

$$P_1 = P_0 + \text{presión barométrica} = 10333 + 10333 = 20666 \text{ Kg./m}^2$$

$$W = 3,45 \times 13,5 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}} \times 10333 \frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2} \left[\left(\frac{20666}{10333} \right)^{0,29} - 1 \right] = 107147,74 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$W = 107147,74/102 = 1050,5 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia utilizada} = 1050,5/0,85 = 1236 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia utilizada} = 1236 \text{ Kw (1-2)}$$

La diferencia en los resultados de los dos métodos, puede deberse a que en el método diagramático hemos supuesto, por comodidad que la variación de la presión con el volumen es una recta, cuando en realidad es una curva.

2.

$$\text{Gas sobrante} = 1'560.000 - 366037 = 1'193.963 \text{ m}^3/\text{día.}$$

$$\text{Potencia calorífica de este} = 1'193.963 \times 926,08 = 1105'705.255 \text{ Kcal./día.}$$

$$= 46'071.052 \text{ Kcal./hr}$$

$$\text{Potencia equivalente} = 46'071.052 \times 0,25/860 = 13393 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia sobrante} = 13393 - 1205 = 12188 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia sobrante} = 12188 \text{ Kw. (1-3)}$$

EJERCICIO N°2 (7)

Un alto horno produce 1020 toneladas cortas de arrabio por día, utiliza 92400 pies cúbicos (condiciones normales) de soplo, por tonelada de arrabio y produce un gas que presenta el siguiente análisis

CO	23,8%
CO ₂	3,3
H ₂ O	3
H ₂	2,5
N ₂	59,1

El horno utiliza por tonelada de arrabio, 760 libras de coque con 87% C. El arrabio contiene 3,5% C.

El soplo es precalentado a 700°C las estufas operan con una eficiencia térmica de 68%. El gas sobrante es utilizado en máquinas a gas que tienen una eficiencia termomecánica del 24%. La presión manométrica de soplo es de 19 lbs./in². Las máquinas de soplado trabajan con una eficiencia del 90%.

PREGUNTAS

1. Los pies cúbicos de gas producido, por tonelada de arrabio.
2. Las libras de CaCO₃ utilizado, por tonelada de arrabio.
3. El porcentaje del carbono del coque que es quemado en las toberas, y el porcentaje utilizado para la reducción directa, encima de las toberas.
4. El porcentaje del poder de calentamiento del coque que es desarrollado en las toberas.
5. El porcentaje del gas del horno que es requerido por las estufas.
6. La potencia generada en las máquinas a gas.
7. La potencia requerida para comprimir el soplo, calculada (a) por la fórmula adiabática y (b) por el diagrama teórico indicador.

SOLUCION

1

$$N_2 \text{ en soplo} = N_2 \text{ en gas.}$$

$$N_2 \text{ en soplo} = 92400 \times 0,79 = 72996 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas} = 72996 / 0,591 = 123513$$

$$\text{Gas producido} = 123513 \text{ ft}^3/\text{ton. de arrabio. (2-1)}$$

2

$$\text{Sea } X = \text{peso del CaCO}_3$$

$$C \text{ en CaCO}_3 = X \cdot 12/100 = 0,12X$$

$$CO \text{ en gas} = 123513 \times 0,238 = 29396 \text{ ft}^3$$

$$CO_2 \text{ en gas} = 123513 \times 0,133 = 16427 \text{ ft}^3$$

$$C \text{ en CO} = 29396 \times 12/359 = 982,6 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en CO}_2 = 16427 \times 12/359 = 549,1 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total C en gas} = 1531,7 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en arrabio} = 1020 \times 0,035 = 70 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ en coque} = 1760 \times 0,87 = 1531,2 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ del coque} \rightarrow \text{gas} = 1531,2 - 70 = 1461,2 \text{ lbs.}$$

$$\text{Total C en gas} = 1461,2 + 0,12X = 1531,7$$

$$X = (1531,7 - 1461,2) / 0,12 = 589,2$$

$$\text{Peso del CaCO}_3 \text{ utilizado} = 589,2 \text{ lbs./ton. de arrabio (2-2)}$$

3.

$$\text{O}_2 \text{ del soplo} = 92400 - 72996 = 19404 \text{ ft}^3$$

Reaccion en las toberas.



$$C = 19404 \times 24/359 = 1297,2 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ del coque consumido en las toberas} = 1297,2/1531,2 = 0,847$$

$$C \text{ del coque consumido en las toberas} = 84,7\% (2-3)$$

$$C \text{ para reducci3n directa} = 1531,2 - 1297,2 = 164 \text{ lbs.}$$

$$C \text{ del coque para reducci3n directa} = 164/1531,2 = 0,107$$

$$C \text{ del coque para reducci3n directa} = 10,7\% (2-3)$$

4.

Calculamos la potencia calorifica total del coque.

$$P.C.B = 14600C + 61000 \times (H - O/8) + 4000S - 1050 \times (9H + W)$$

Suponiendo que el H₂ de los gases proviene del coque y que el H₂O proviene de la humedad de la carga, la potencia calorifica del coque quedaria

$$H_2 = 123513 \times 0,025 \times 2/359 = 17,2 \text{ lbs.}$$

$$P.C.B = 14600 \times 1531,2 + 61000 \times (17,2 - 0) + 0 - 1050 \times (9 \times 17,2 + 0) = 23'242.180 \text{ BTU}$$

El calor no desarrollado se encuentra en el gas, representado por el H₂ y el CO, y en el C del arrabio.

$$\text{Calor no desarrollado} = 0,238 \times 123513 \times 341 + 0,025 \times 123513 \times 290 + 14600 \times 70 = 11'940.388 \text{ BTU}$$

$$\text{Calor desarrollado} = 23'242.180 - 11'940.388 = 11'301.792 \text{ BTU.}$$

$$\text{Calor desarrollado} = 11'301.792/23'242.180 = 0,4862$$

$$\text{Calor del coque desarrollado en el horno} = 48,62\% (2-4)$$

5

Vamos a desarrollar este punto en metros cubicos:

$$\text{Soplo} = 92400 / 35,3145 = 2616,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas} = 123513 / 35,3145 = 3497,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Contenido de calor del soplo a } 700^\circ\text{C} = 2616,4 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-4} \times 700) \times 700 = 581.311,75 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor en gas} = 0,238 \times 3040 + 0,025 \times 2582 = 786,642 \text{ Kcal./m}^3$$

Las estufas trabajan al 68% de eficiencia.

$$\text{Calor total en estufas} = 581311,75/0,68 = 854870,22 \text{ Kcal}$$

Gas requerido por las estufas = $854870.22 \text{ Kcal} / 786.642 \text{ Kcal/m}^3 = 1086.74 \text{ m}^3$

Gas requerido por las estufas = $1086.74 / 3497.5 = 0.3107$

Gas requerido por las estufas = 31.07% (2-5)

6

Gas total = $3497.5 \times 1020 = 3'567.450 \text{ m}^3$

Gas \rightarrow estufas = $1086.74 \times 1020 = 1'108.475 \text{ m}^3$

Gas sobrante = $3'567.450 - 1'108.475 = 2'458.975 \text{ m}^3$

P C B de este = $2'458.975 \text{ m}^3 \times 786.642 \text{ Kcal/m}^3 = 1934'333.012 \text{ Kcal/día.}$

P C B de este = $1934'333.012 / 24 = 80'597.209 \text{ Kcal/hr.}$

Potencia generada en máquinas a gas = $80'597.209 \times 0.24 = 860'22492 \text{ Kw}$

Potencia generada en máquinas a gas = 22492 Kw. (2-6)

7.a

Utilizando la ecuación adiabática (Expresión 1):

$V_0 = 92400 \times 10.70 = 35'3145 = 2'668.819 \text{ m}^3/\text{día} = 2'668.819/86400 = 30.9 \text{ m}^3/\text{seg}$

$P_0 = 1 \text{ atm.} = 10333 \text{ Kg./m}^2$

$P_1 = 14.7 + 19 = 33.7 \text{ lbs/in}^2 = 33.7 / 14.7 = 2.29 \text{ atm}$

Potencia = $3.45 \times 30.9 \times 10333 \times [(2.29/1)^{0.29} - 1] = 299187 \text{ Kg.-m/seg.}$

Las máquinas de soplado tienen una eficiencia del 90%

Potencia requerida para comprimir el soplo = $299187/0.9 \times 102 = 3259 \text{ Kw}$

Potencia requerida para comprimir el soplo = 3259 Kw. (2-7.a)

7.b

Sobre la base de la Fig. 1, aplicaremos el método diagramático:

$V_0 = 30.9 \text{ m}^3/\text{seg.}$

$P_0 = 14.7 \text{ psi.}$

$P_1 = 33.7 \text{ psi.}$

$x_D = 14.7/33.7$

$A_x = 19/33.7$

Area xBCD = $19 \times 14.7/33.7 = 8.29 \text{ psi.}$

Area ABx = $(1/2) \times 19 \times 19/33.7 = 5.36 \text{ psi.}$

Area total = $8.29 + 5.36 = 13.65 \text{ psi.}$

Area total = $13.65/14.7 = 0.929 \text{ atm}$

Potencia = $30.9 \times 0.929 \times 10333 / 0.9 \times 102 = 3231.2 \text{ Kw}$

Potencia requerida para comprimir el soplo = 3231.2 Kw (2-7.b)

EJERCICIO N°3 (7)

El alto horno del ejercicio #5 del capítulo VII utiliza una presión de soplado de atmosférica (manométrica) y tiene capacidad para 600 toneladasargas por día.

Este horno tiene 120 pies de altura por encima de la boca de carga. El soplo es precalentado a 540°C. La eficiencia térmica de las estufas es del 70%.

El gas sobrante es convertido en potencia en las máquinas a gas, con 25% de eficiencia termomecánica.

PREGUNTAS

1. La potencia requerida para suministrar el soplo (utilizar el metodo adiabático y el diagramático).

2. El porcentaje del gas utilizado en las estufas.
3. La potencia que puede ser generada por el gas remanente.
4. La potencia requerida para elevar la carga sólida a la parte superior del horno.

SOLUCION

1

Metodo adiabático:

$$W = 3,45 \times V_0 P_0 \times [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$\text{Soplo} = 137000 \text{ ft}^3/\text{ton.}$$

$$\begin{aligned} \text{Soplo total} &= 137000 \times 600 = 82'200.000 \text{ ft}^3/\text{día} = 82'200.000/35,3145 \\ &= 2'327.656 \text{ m}^3/\text{día} = 2'327,656/86400 = 27 \text{ m}^3/\text{seg.} \end{aligned}$$

$$V_0 = 27 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$P_0 = 10333 \text{ Kg./m}^2 = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm.}$$

$$P_1 = 14,7 + 14,7 = 29,4 \text{ psi.} = 29,4/14,7 = 2 \text{ atm.}$$

$$W = 3,45 \times 27 \times 10333 \times [(2/1)^{0,29} - 1] = 214295,49 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$W = 214295,49/102 = 2100,9 \text{ Kw.}$$

$$1 \text{ Kw} = 1,341 \text{ H.P.}$$

$$W = 2100,9 \times 1,341 = 2817 \text{ H.P.}$$

$$\text{Potencia requerida} = 2817 \text{ H.P. (3-1)}$$

Método diagramático (Fig. #1):

$$V_0 = 27 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$P_0 = 14,7 \text{ psi.}$$

$$P_1 = 29,4 \text{ psi.}$$

$$x_D = P_0/P_1 = 14,7/29,4 = 0,5$$

$$A_x = 1 \quad x_D \quad 1 \quad 0,5 \quad 0,5$$

$$\text{Area } xBCD = 0,5 \times 14,7 = 7,350 \text{ psi}$$

$$\text{Area } ABx = 0,5 \times 0,5 \times 14,7 = 3,675 \text{ psi.}$$

$$\text{Area total} = 11,025 \text{ psi.} = 11,025/14,7 = 0,75 \text{ atm}$$

$$W = 27 \times 0,75 \times 10333 = 209243,35 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$W = 209243,35 / 102 = 2051,4 \text{ Kw.}$$

$$W = 2051,4 \times 1,341 = 2750,9 \text{ H.P.}$$

$$\text{Potencia requerida} = 2750,9 \text{ H.P. (3-1)}$$

2

$$\text{CO} = 36331 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas total} = 169982 \text{ ft}^3 = 4823,4 \text{ m}^3/\text{ton de arrabio.}$$

$$\text{Soplo} = 137000 \text{ ft}^3 = 3880 \text{ m}^3/\text{ton de arrabio.}$$

$$\text{CO} = 36331/169982 = 21,4\%$$

$$\text{Calor en gas} = 0,214 \times 3034 = 649,276 \text{ Kcal./m}^3$$

Precalentamiento del aire a 540°C $3880 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 540) \times 540 = 657641 \text{ Kcal}$

Eficiencia de las estufas = 70%

Calor total en estufas para precalentar = $657641/0,7 = 939488 \text{ Kcal.}$

Gas a estufas = $939488 \text{ Kcal} / 649,276 \text{ Kcal/m}^3 = 1447 \text{ m}^3$

Gas utilizado en estufas = $1447/4813,4 = 0,301$

Gas utilizado en estufas = 30,1% (3-2)

3.

Gas remanente = $4813,4 - 1447 \times 600 = 2'019\,840 \text{ m}^3/\text{día.}$

Calor que genera este gas = $2'019\,840 \times 0,214 \times 3034 = 1311'433.636 \text{ Kcal./día}$
 $= 1311'433.636 / 24 = 54'643.068 \text{ Kcal./hr.}$

(calor útil/calor total) = 0,25

Calor útil = $54'643\,068 \times 0,25 = 13'660.767 \text{ Kcal./hr}$

1 H.P = 641,8 Kcal /hr.

Calor útil = $13'660\,767/641,8 = 21285 \text{ H.P}$

Potencia que puede generar el gas remanente = 21285 H.P (3-3)

4.

1 tonelada larga = 2240 libras.

Potencia = mgh

mg = carga = $2240 \times 600 = 1'344\,000 \text{ lbs./día}$

h = altura = 120 ft.

Potencia = $1'344.000 \text{ lbs./día} \times 120 \text{ ft} \times 1 \text{ día}/24 \text{ hr} \times 1 \text{ hr}/60 \text{ min.} \times 1 \text{ min.}/60 \text{ seg.}$
 $= 1866,7 \text{ lb.-ft/seg.}$

1 lb.-ft/seg. = 0,00182 H.P

Potencia requerida para elevar la carga = $1866,7 \times 0,00182/0,25 = 13,6 \text{ H.P}$

Potencia requerida para elevar la carga = 13,6 H.P (3-4)

EJERCICIO N°4 (7)

Un alto horno produce 720 toneladas métricas de arrabio por día y salen por tonelada 4084 metros cúbicos de gas de la siguiente composición: 24,7%CO, 14,3%CO₂, 0,5%H₂ y 60,5%N₂.

Parte de este gas es utilizado en las estufas que calientan el soplo de 0°C a 750°C a una eficiencia térmica del 65%. El soplo es utilizado a una presión manométrica de 20 psi.

El resto del gas es utilizado en máquinas a gas que producen potencia para las máquinas de soplado y ponen en marcha generadores eléctricos. Las máquinas de soplado tienen una eficiencia termomecánica del 90% y 85% de eficiencia para reparto volumétrico (ver aclaración en ejercicio 5). Los generadores operan al 92% de eficiencia, y las máquinas a gas a 25% de eficiencia.

PREGUNTAS

1. La proporción del gas que debe ser enviado a las estufas.
2. La proporción del gas necesaria para poner en marcha las máquinas de soplado.
3. La potencia disponible para los generadores.

SOLUCION

El esquema de flujo de los gases se muestra en la Figura N°2.

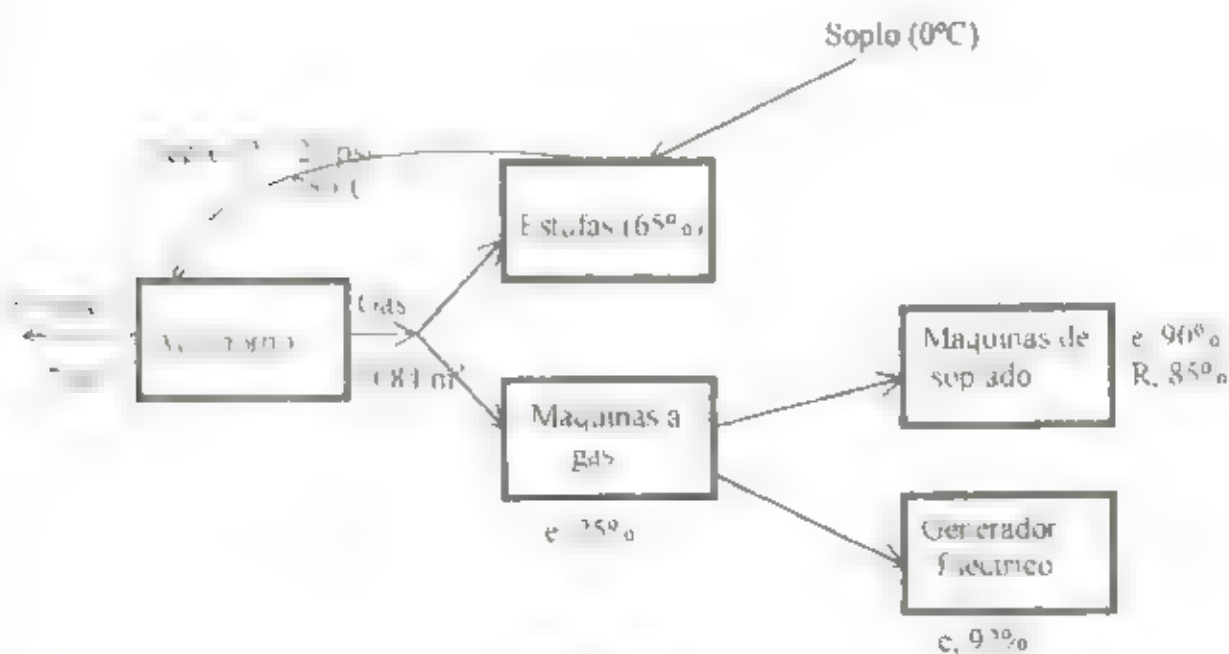


Figura N°2

Para determinar la cantidad de gas que debe ser enviado a las estufas utilizaremos la siguiente expresión:

$$m^3 \text{ de gas} = \frac{\text{Calor total}}{\text{Calor } m^3 \text{ de gas}} \quad (2)$$

$$N_2 \text{ en gas} = N_2 \text{ en soplo}$$

$$\text{Gas producido} = 720 \times 4084 = 2'940,480 \text{ m}^3$$

$$N_2 \text{ en gas} = 2'940,480 \times 0,605 = 1'778,990,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 1'778,990,4 / 0,79 = 2'251,886,6 \text{ m}^3/\text{dia.}$$

$$\text{Precalentamiento de soplo a } 750^\circ\text{C} = 2'251,886,6 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-4} \times 750) \times 750 = 537'919,410 \text{ Kcal}$$

Las estufas trabajan con 65% de eficiencia (Fig. #2):

$$\text{Calor total} = 537'919,410 / 0,65 = 827'568,330 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor producido por el gas} = CO + H_2$$

$$CO = 0,247 \times 3034 = 749,398 \text{ Kcal.}$$

$$H_2 = 0,005 \times 2582 = 12,910 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor producido por el gas} = 762,308 \text{ Kcal./m}^3$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 827'568,330 \text{ Kcal} / 762,308 \text{ Kcal/m}^3 = 1'085,608,9 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 1'085,608,9 / 2'940,480 = 0,369$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 36,9\% \quad (4-1)$$

2

La proporcion de gas necesaria para poner en marcha las maquinas de soplado, puede ser calculada sobre la base de la potencia requerida para el soplado y esta la determinaremos con la ayuda de la ecuacion (1), es decir, utilizando la fórmula adiabática.

$$W = 3,45 V_0 P_0 \cdot [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$V_0 = (2'251,887/0,85) \cdot [(750 + 273)/273] \text{ m}^3/\text{dia} \times 1 \text{ dia}/86400 \text{ seg.} = 115 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$P_0 = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm.}$$

$$P_1 = P_0 + 20 = 14,7 + 20 = 34,7 \text{ psi.} = 34,7/14,7 = 2,36 \text{ atm.}$$

$$1 \text{ atm.} = 10333 \text{ Kg./m}^2; 1 \text{ Kw} = 102 \text{ Kg./m}^2$$

$$W = 3,45 \times 115 \text{ m}^3/\text{seg.} \times 1 \text{ atm} \times 10333 (\text{Kg./1 atm} \times \text{m}^2) \times [(2,36)^{0,29} - 1] \\ = 1'159,196,7 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$W = 2'159,196,7 / 0,9 \times 102 = 12627,4 \text{ Kw.}$$

$$1 \text{ Kw-hr.} = 860 \text{ Kcal}$$

$$W = 12627,4 \times 860 = 10'859\,577 \text{ Kcal/hr}$$

$$C_{us} = \frac{10'859,577 \text{ Kcal.}}{762,3 \text{ Kcal}} \times \frac{\text{hr}}{\text{m}^3} \times \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ dia}} = 341899,31 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Proporcion de gas} = 341,899,31/2'940\,480 = 0,116$$

$$\text{Proporcion de gas para máquinas de soplado} = 11,6\% \text{ (4-2)}$$

3.

$$\text{Gas total} = \text{Gas (máquinas a gas)} + \text{gas (estufas)}$$

$$\text{Gas} \rightarrow \text{máquinas a gas} = 2'940,480 - 1'085\,609 = 1'854,871 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$\text{Gas} \rightarrow \text{máquinas de soplado} = 341900 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$\text{Gas (máquinas a gas)} \rightarrow \text{generadores} = 1'854,871 - 341900 = 1'512\,971 \text{ m}^3/\text{dia} \\ = 1'512\,971/24 = 63040 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\text{Calor en máquinas a gas} \rightarrow \text{generadores} = \text{CO} + \text{H}_2$$

$$\text{CO} = 63040 \times 0,247 \times 3034 = 47'242\,050$$

$$\text{H}_2 = 63040 \times 0,005 \times 2582 = 813\,846$$

$$\text{Calor total} = 48'055\,896 \text{ Kcal/hr.}$$

$$\text{Calor útil, calor total} = 0,25$$

$$\text{Calor útil (máquinas a gas)} \rightarrow \text{generadores} = 48\,055\,896 \times 0,25 = 12\,013\,974 \text{ Kcal/hr}$$

$$\text{Potencia generadores} = \frac{12'013,974 \text{ Kcal.}}{860 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}} \times 0,92 = 12892 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia útil en los generadores} = 12852 \text{ Kw (4-3)}$$

EJERCICIO N°5 (7)

Un alto horno produce 880 toneladas métricas de arrabio por día y consume por tonelada de arrabio 640 kilogramos de mineral, 920 kilogramos de coque y 260 kilogramos de CaCO_3 . El arrabio contiene 3,6%C y el coque analiza 88%C.

El gas del alto horno está compuesto por lo siguiente:

CO	24,7%
CO ₂	14,3
CH ₄	0,5
N ₂	60,5

El soplo es precalentado a 650°C en estufas que trabajan a una eficiencia térmica de 75%.

El gas que no es requerido por las estufas, es utilizado para producción de potencia en máquinas a gas que operan a una eficiencia termomecánica de 23%. Las máquinas a gas impulsan las máquinas de soplo, las cuales suministran el soplo al horno, al igual que generadores eléctricos que producen potencia adicional. Las máquinas de soplo operan a 90% de eficiencia mecánica, y el eficiente de reparto de aire es de 94%. Los generadores poseen una eficiencia del 92%.

La presión manométrica del soplo es de 22 psi.

La carga es elevada a la parte de arriba del horno, por un skip automático operado eléctricamente a 75% de eficiencia, altura de levantamiento, 25 metros. Asumir que el levantamiento se realiza en 1/4 del tiempo.

PREGUNTAS

1. El volumen del gas y del soplo, por tonelada de arrabio.
2. La proporción del gas total que es requerido por las estufas.
3. La potencia producida por las máquinas a gas.
4. La potencia requerida para mover las máquinas de soplo, calculada a partir del diagrama teórico indicador y a partir de la fórmula adiabática.
5. la potencia requerida por el elevador.
6. La potencia sobrante, y el consumo neto de coque por tonelada de arrabio después de adicionar esta potencia sobrante al horno.

SOLUCION

1.

Para el cálculo del volumen de gas, utilizaremos la siguiente expresión, ya utilizada en capítulos anteriores

$$m^3 \text{ de gas} = \frac{C \text{ total en gas}}{C \text{ en } m^3 \text{ de gas}} \quad (3)$$

$$C \text{ total en gas} = C \text{ en coque} + C \text{ en } \text{CaCO}_3 + C \text{ en arrabio}$$

$$C \text{ total en gas} = 920 \times 0,88 + 260 \times 0,12 + 1000 \times 0,036 = 804,8 \text{ Kg.}$$

Supongamos 1 m³ de gas:

$$C \text{ en gas} = (0,247 + 0,143 + 0,005) \times 12/22,4 = 0,2116 \text{ Kg./m}^3$$

$$\text{Gas} = 804,8/0,2116 = 3803,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del gas} = 3803,4 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (5-1)}$$

$$N_2 \text{ en gas} = 3803,4 \times 0,605 = 2301 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 2301/0,79 = 2912,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen del soplo} = 2912,7 \text{ m}^3/\text{ton. de arrabio (5-1)}$$

2

Volvemos a utilizar la ecuación (2):

$$\text{Gas total} = 3803,4 \times 880 = 3'346.992 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Soplo total} = 2912,7 \times 880 = 2'563.176 \text{ m}^3/\text{día.}$$

$$\begin{aligned} \text{Precalentamiento de soplo a } 650^\circ\text{C} &= 2'563.176 \times (0,302 - 2,2 \times 10^{-4} \times 650) \times 650 \\ &= 526'976.170 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

La eficiencia térmica de las estufas es de 62%

$$\text{Calor total} = 526'976.170/0,62 = 849'961.560 \text{ Kcal./día.}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 0,247 \times 3034 + 0,005 \times 8560 = 792,198 \text{ Kcal m}^{-3}$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 849'961.560/792,198 = 1'072.915,6 \text{ m}^3/\text{día.}$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 1'072.915,6 / 3'346.992 = 0,3206$$

$$\text{Gas requerido por las estufas} = 32,06\% \text{ (5-2)}$$

3

El flujo de los gases en este ejercicio, se ajusta al de la Figura N°2.

$$\text{Gas total} = \text{gas a estufas} + \text{gas a máquinas a gas.}$$

$$\text{Gas} \rightarrow \text{máquinas a gas} = 3'346.992 - 1'072.915,6 = 2'274.076,4 \text{ m}^3/\text{día.}$$

$$\text{Calor que aporta este gas} = \text{CO} + \text{CH}_4$$

$$\text{CO} = 2'274.076,4 \times 0,247 \times 3034 = 1704'188.300$$

$$\text{CH}_4 = \quad \quad \times 0,005 \times 8560 = 97'330.470$$

$$\text{Poder calórico total de este gas} = 1801'518.800 \text{ Kcal./día.}$$

$$\text{Poder calórico total} = 1801'518.800 / 24 = 75'063.282 \text{ Kcal./hr.}$$

La eficiencia termomecánica de las máquinas a gas es del 23%

$$\text{Calor útil / calor total} = 0,23$$

$$\text{Calor útil} = 75'063.282 \times 0,23 = 17'264.555 \text{ Kcal./hr}$$

$$1 \text{ Kw} = 860 \text{ Kcal/hr}$$

$$\text{Potencia} = 17'264.555 / 860 = 20075 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia producida en máquinas a gas} = 20075 \text{ Kw. (5-3)}$$

4

El término *coeficiente de reparto* o *eficiencia volumétrica* se utiliza aquí para expresar la relación entre la cantidad de aire alimentado al horno, a la cantidad que entra al cilindro de compresión.

Método del diagrama teórico indicador (Fig. #1):

$$P_0 = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm}$$

$$P_1 = 14,7 + 22 = 36,7 \text{ psi.}$$

$$\begin{aligned}x_D &= P_o/P_i = 14,7/36,7 \\Ax &= 1 - x_D = 22/36,7 = 1 - 14,7/36,7 \\Altura &= x_B = 22\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Area del rectángulo} &= (x_D) \cdot (CD) = 22 \times 14,7/36,7 = 8,81 \\ \text{Area del triángulo} &= \frac{1}{2} \cdot (Ax) \cdot (Bx) = \frac{1}{2} \times 22 \times 22/36,7 = 6,59 \\ \text{Area total} &= 15,40 \text{ psi.} = 1,048 \text{ atm}\end{aligned}$$

$$V_o = \frac{2'563.176 \frac{m^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ seg.}} = 31,5 \frac{m^3}{\text{seg.}}$$

$$\text{Potencia} = 31,5 (m^3/\text{seg}) \times 1,048 \text{ atm} \times 10333 (Kg/m^2) (1 \text{ atm}) = 341113 \text{ Kg.-m/seg}$$

$$1 \text{ Kw} = 102 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$\text{Potencia requerida} = 341113/102 \times 0,9 = 3715,8 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia requerida por maquinas de soplado} = 3715,8 \text{ Kw (5-4)}$$

Metodo de la fórmula adiabática:

$$\text{Potencia} = 3,45 V_o P_o x [(P_i/P_o)^{0,29} - 1]$$

$$V_o = 32,5 m^3/\text{seg.}$$

$$P_o = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm.}$$

$$P_i = 14,7 + 22 = 36,7 \text{ psi.} = 2,5 \text{ atm.}$$

$$\text{Potencia} = 3,45 \times 31,5 \frac{m^3}{\text{seg.}} \times 1 \text{ atm.} \times 10333 \frac{Kg.}{m^2} \frac{1}{\text{atm}} \left[\left(\frac{2,5}{1} \right)^{0,29} - 1 \right]$$

$$= 341795 \frac{Kg.-m}{\text{seg.}}$$

$$\begin{aligned}5 \\ E &= mgh\end{aligned}$$

$$h = \text{altura a elevar} = 25 \text{ m.}$$

$$\text{Peso} = mg = (1640 + 920 + 260) \times 880 = 2'481.600 \text{ Kg./día.}$$

$$\text{El tiempo de levantamiento} = \frac{1}{4} \text{ de día.} = 0,25 \text{ días.}$$

$$\text{Peso} = 2'481.600 \frac{Kg.}{0,25 \text{ día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr.}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ seg.}} = 114,9 \frac{Kg.}{\text{seg.}}$$

$$E = 114,9 \times 25 = 2872,5 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$\text{Eficiencia} = 75\%$$

$$\text{Potencia} = 2872,5/0,75 = 3830 \text{ Kg.-m/seg.}$$

$$\text{Potencia} = 3830/102 = 37,5 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia requerida por el elevador} = 37,5 \text{ Kw (5-5)}$$

6

De acuerdo al diagrama de la Fig. #2.

$$\text{Gas (maquinas a gas)} = \text{gas (maquinas de soplado)} + \text{gas (generadores)}$$

$$\text{Potencia a generadores} = 20075 - 3723 = 16352 \text{ Kw}$$

$$\text{Eficiencia en generadores} = 92\%$$

$$\text{Potencia sobrante útil} = 16352 \times 0,92 = 15044 \text{ Kw}$$

$$\text{Potencia sobrante útil} = 15044 \text{ Kw (5-6)}$$

Consumo de coque por tonelada de arrabio:

$$\text{Calor adicionado de la potencia sobrante} = 16352 \times 860 \times 24.886 = 383529 \text{ Kcal}$$

$$C \text{ del coque que quema en toberas} = C \text{ total} - C \text{ en } CH_4 - C \text{ en arrabio}$$

$$CH_4 = 3803,4 \times 0,005 = 19 \text{ m}^3$$

$$C \text{ en } CH_4 = 19 \times 12/22,4 = 10,2 \text{ Kg}$$

$$C \text{ del coque que quema en toberas} = 920 \times 0,88 - 10,2 - 1000 \times 0,036 = 763,4 \text{ Kg}$$

$$\text{Reacción en toberas: } C + \frac{1}{2} O_2 = CO$$

$$\text{Calor de esta combustión} = 763,4 \times 2430 = 1'855.062 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor neto} = 1'855.062 - 383529 = 1'471.533 \text{ Kcal}$$

$$C \text{ necesario para producir este calor} = 1'471.533/2430 = 605,5 \text{ Kg}$$

$$\text{Coque equivalente} = 605,5/0,88 = 688,1 \text{ Kg}$$

$$\text{Consumo de coque despues de adicionar la potencia sobrante} = 688,1 \text{ Kg. (5-6)}$$

EJERCICIO N°6 (7)

Un convertidor Bessemer es cargado con 18 toneladasargas de arrabio de la siguiente composición

Fe	93,2%
C	3,6
Si	1,8
Mn	1,4

El soplo oxida todas las impurezas, y en adición se oxidan 1200 libras de Fe durante el segundo periodo. Dos tercios del carbono pasan a CO y el resto a CO₂.

Las maquinas de sopado suministran el aire a una rata de 17000 ft³ min medido a condiciones normales. El soplo es aumentado a una presión manométrica de 2 atmosferas

PREGUNTAS

1. El volumen de aire a condiciones normales, necesario para el sopado de la carga
2. El tiempo de duración de cada periodo de sopado.
3. Las composiciones de la escoria y los gases.
4. La potencia requerida para poner en marcha las maquinas de sopado, asumiendo una eficiencia del 80%.

SOLUCION

1

$$1 \text{ tonelada larga} = 2240 \text{ libras}$$

$$\text{Arrabio} = 18 \times 2240 = 40320 \text{ lbs}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Fe} &= 0,932 \times 40320 = 37578,24 \\
 \text{C} &= 0,036 \times 40320 = 1451,52 \\
 \text{Si} &= 0,018 \times 40320 = 725,76 \\
 \text{Mn} &= 0,014 \times 40320 = 564,48
 \end{aligned}$$

Oxidaciones.

$$\begin{aligned}
 \text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{CO}: \quad \text{O}_2 = 2/3 \times 1451,52 \times 0,5 \times 359/12 = 14474,88 \text{ ft}^3 \\
 \text{C} + \text{O}_2 &= \text{CO}_2: \quad \text{O}_2 = 1/3 \times 1451,52 \times 359/12 = 14474,88 \\
 \text{Si} + \text{O}_2 &= \text{SiO}_2: \quad \text{O}_2 = 725,76 \times 359/28 = 9305,28 \\
 \text{Mn} + \text{O}_2 &= \text{MnO}: \quad \text{O}_2 = 564,48 \times 359/2 \times 55 = 1842,26 \\
 \text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{FeO}: \quad \text{O}_2 = 1200 \times 359/2 \times 56 = 3846,43 \\
 \text{O}_2 \text{ total para oxidaciones} &= 43943,73 \text{ ft}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{Aire} = 43943,73/0,21 = 209256 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire para el soplado de la carga} = 209256 \text{ ft}^3 \text{ (6-1)}$$

2.

Primer periodo de soplado = oxidación del Mn y el Si

$$\text{O}_2 \text{ para el 1º periodo} = 9305,28 + 1842,26 = 11147,54 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire para el 1º periodo} = 11147,54/0,21 = 53083,524 \text{ ft}^3$$

$$t_1 = 53083,524 \text{ ft}^3 / 17000 \text{ ft}^3/\text{min.} = 3,1 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo de soplado para el primer periodo} = 3,1 \text{ min. (6-2)}$$

Segundo periodo de soplado = Oxidación del C y del Fe.

$$\text{O}_2 \text{ para el 2º periodo} = 14474,88 \times 2 + 3846,43 = 32796,19 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire para el 2º periodo} = 32796,19/0,21 = 156172,33 \text{ ft}^3$$

$$t_2 = 156172,33/17000 = 9,2 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo de soplado para el segundo periodo} = 9,2 \text{ min. (6-2)}$$

3.

Escoria = $\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{FeO}$

Composición de la escoria (6-3)

$$\text{SiO}_2 = 725,76 \times 60/28 = 1555,2 \text{ lbs.} = 40,6\%$$

$$\text{MnO} = 564,48 \times 71/55 = 728,7 \text{ lbs.} = 19,1\%$$

$$\text{FeO} = 1200 \times 72/56 = 1542,8 \text{ lbs.} = 40,3\%$$

$$3826,7 \text{ lbs.} = 100,0\%$$

Gases = $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$

Composición del gas (6-3)

$$\text{CO} = 2 \text{ O}_2 \text{ del C} = 14474,88 \times 2 = 28949,76 \text{ ft}^3 = 13,9\%$$

$$\text{CO}_2 = \text{O}_2 \text{ del C} = 14474,88 \text{ ft}^3 = 6,9\%$$

$$\text{N}_2 = 209256 \times 0,79 = 165312,24 \text{ ft}^3 = 79,2\%$$

$$208736,88 \text{ ft}^3 = 100,0\%$$

4.

$$1 \text{ m}^3 = 35,314 \text{ ft}^3$$

Utilizando la fórmula adiabática.

$$W = 3,45 V_0 P_0 [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$V_0 = 17000 / 35,314 \times 60 = 8,023 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$P_0 = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm.}$$

$$P_1 = P_0 + P (\text{manómetro}) = 1 + 2 = 3 \text{ atm.}$$

$$W = 3,45 \times 8,023 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}} \times 1 \text{ atm} \times 10333 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \times \frac{1}{\text{atm}} \left[\left(\frac{3}{1} \right)^{0,29} - 1 \right]$$

$$= 107310,59 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{seg}}$$

$$W = 107310,59 / 102 \times 0,8 = 1315 \text{ Kw}$$

Potencia requerida por máquinas de soplado = 1315 Kw. (6-4)

EJERCICIO N°7 (7)

Un convertidor Bessemer ácido sopla 20 toneladas métricas de arrabio a hierro prácticamente puro. El arrabio contiene 3,6% C, 1,4% Si, 1,0% Mn y 94,0% Fe. La cantidad de hierro oxidado equivale al 2,8% del peso del arrabio, tres cuartos del carbono pasa a CO y el resto a CO₂.

La presión (manométrica) del soplado es 25000 kg/m². Las máquinas de soplado trabajan a 50 r.p.m. y son de doble acción. El diámetro interno del cilindro es de 1,6 metros y la longitud del embolo es de 2 metros. El vástago del pistón tiene 15 cm de diámetro y se extiende a través de ambos extremos del cilindro. La eficiencia mecánica de la máquina es de 92% y la eficiencia de reparto del aire es de 88%.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire, a condiciones normales, necesario para el soplado.
2. El tiempo requerido, por periodo.
3. El volumen y composición de los gases en cada periodo.
4. La potencia requerida por las máquinas de soplado.

SOLUCION

1.

$$\text{Arrabio} = 20000 \text{ Kg.}$$

$$C = 20000 \times 0,036 = 720$$

$$Si = 20000 \times 0,014 = 280$$

$$Mn = 20000 \times 0,010 = 200$$

$$Fe = 20000 \times 0,94 = 18800$$

Oxidaciones

$$C \rightarrow CO = 720 \times \frac{3}{4} = 540 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 720 - 540 = 180$$

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO: \quad O_2 = 540 \times \frac{22,4}{24} = 504,0 \text{ m}^3$$

$$C + O_2 = CO_2: \quad O_2 = 180 \times \frac{22,4}{12} = 336,0$$

$$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO: \quad O_2 = 200 \times \frac{22,4}{110} = 40,7$$

$$Si + O_2 = SiO_2: \quad O_2 = 280 \times \frac{22,4}{28} = 224,0$$

$$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO: \quad O_2 = 20000 \times 0,028 \times \frac{22,4}{112} = 112,0$$

$$\text{Total } O_2 \text{ para oxidaciones} = 1216,7 \text{ m}^3$$

$$\text{Soplo} = 1216,7 / 0,21 = 5793,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total de aire, C.N.} = 5793,8 \text{ m}^3 \text{ (7-1)}$$

2.

Debemos encontrar el volumen de aire (O_2) comprimido por minuto, utilizando el coeficiente de reparto porque usamos la longitud del émbolo (Stroke), procedemos así:

Cilindro: diámetro = 1,6 m.; radio = 0,8 m.

Vástago (pistón): diámetro = 0,15 m; radio = 0,075 m.

Radio efectivo = $0,8 - 0,075 = 0,725 \text{ m.}$

Longitud del émbolo (stroke) = 2 m.

r.p.m. = 50; doble acción. = 2

Eficiencia de reparto = 88%

Eficiencia mecánica = 92%

Volumen de aire comprimido = V

$$V = \pi (0,8)^2 \times 2 \times 2 \times 50 \times 0,88 = 353,869 \text{ m}^3/\text{min.}$$

$$O_2 = 353,869 \times 0,21 = 74,31 \text{ m}^3/\text{min.}$$

$$O_2 \text{ del 1}^\circ \text{ período sin el de Fe} = \text{Si} + \text{Mn} = 224 + 40,7 = 264,7 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del 2}^\circ \text{ período sin el de Fe} = \text{C} + \text{C} = 336 + 504 = 840 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ para oxidación del Fe} = 112 \text{ m}^3$$

Si asumimos una oxidación uniforme del Fe:

$$t_1 (\text{sin Fe}) = 264,7/74,3 = 3,56 \text{ min.}$$

$$t_2 (\text{sin Fe}) = 840/74,3 = 11,30 \text{ min}$$

$$t \text{ total sin Fe} = 14,86 \text{ min.}$$

$$t \text{ para oxidación del Fe} = 112/74,3 = 1,51 \text{ min.}$$

$$t_1 (\text{con Fe}) = 3,56 + 1,51 \times (3,56/14,86) = 4,0 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de soplado para el 1}^\circ \text{ período} = 4,0 \text{ min. (7-2)}$$

$$t_2 (\text{con Fe}) = 11,30 + 1,51 \times (11,30/14,86) = 12,5 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo de soplado para el 2}^\circ \text{ período} = 12,5 \text{ min. (7-2)}$$

3.

Primer período:

En este período hay oxidación del Si, Mn y algo de Fe, por tanto, el gas estará compuesto solo por N_2 .

$$O_2 \text{ del Fe en este período} = 112 \times 3,56/14,86 = 26,83 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ total del 1}^\circ \text{ período} = 264,7 + 26,83 = 291,53 \text{ m}^3$$

$$N_2 = 291,83 \times 79/21 = 1097 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen y composición del en el 1}^\circ \text{ período} = 1097 \text{ m}^3 = 100\% N_2 \text{ (7-3)}$$

Segundo período:

Gas del 2º período = $N_2 + CO + CO_2$

$$O_2 \text{ total de este período} = 504 + 336 + 112 \times 11,30/14,86 = 925,4 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen y composición del gas del 2}^\circ \text{ período (7-3)}$$

$$\begin{aligned}
 N_2 &= 925,2 \times 79/21 = 3480,4 \text{ m}^3 = 72,1\% \\
 CO &= 504 \times 2 = 1008,0 \text{ m}^3 = 20,9\% \\
 CO_2 &= \frac{336,0 \text{ m}^3}{4824,4 \text{ m}^3} = 7,0\% \\
 &= 100,0\%
 \end{aligned}$$

4

Usamos la expresión adiabática:

$$W = 3,45 V_0 P_0 [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$V_0 = \frac{74,3}{0,21 \times 0,88} \frac{\text{m}^3}{\text{min.}} \times \frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ seg.}} = 6,7 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}}$$

$$P_0 = 14,7 \text{ psi} = 1 \text{ atm.} = 10333 \text{ Kg./m}^2$$

$$P_1 = P_0 + P (\text{manómetro}) = 1 + 25000/10333 = 3,42 \text{ atm.}$$

$$W = 3,45 \times 6,7 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}} \times 1 \text{ atm} \times 10333 \frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2} \times \frac{1}{\text{atm.}} \left[\left(\frac{3,42}{1} \right)^{0,29} - 1 \right]$$

$$= 102336,11 \frac{\text{Kg.m}}{\text{seg.}}$$

$$1 \text{ Kw} = 102 \text{ Kg.m. seg.}$$

$$W = 102336,11 / 102 \times 0,92 = 1090 \text{ Kw.}$$

Potencia requerida por máquinas de soplado = 1090 Kw (7-4)

EJERCICIO N°8 (7)

Una carga de 10 toneladas de arrabio en un convertidor produce una escoria con el siguiente análisis: 31,2% FeO, 25,4% MnO y 43,4% SiO₂. La escoria pesó 915 kilogramos, incluyendo 183 Kg. de SiO₂ provenientes del recubrimiento del convertidor.

Los gases del convertidor totalizaron 3190 metros cúbicos, medidos a condiciones normales, y su análisis fue: 16,2% CO, 7,0% CO₂ y 76,8% N₂. El soplo fue alimentado a una presión (manómetro) de 1,8 atmósferas. El tiempo de soplado fue de 12 minutos.

PREGUNTAS

1. La composición del arrabio utilizado en el convertidor.
2. Los metros cúbicos de aire requeridos para el soplado (calculado por el método del oxígeno y el del nitrógeno).
3. Si la temperatura a la cual el volumen del gas dado arriba fue medido, fue de 27°C y el barómetro de 740 mm., en lugar de las condiciones normales, ¿cuánto vapor (kilogramos por metro cúbico de aire) deberían adicionarse al soplo sin cambiar el tiempo de soplado?
4. La potencia requerida de las máquinas de soplado, asumiendo 88% de eficiencia.

SOLUCION

1.

$$\text{Arrabio} = \text{Fe} + \text{Si} + \text{Mn} + \text{C}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ en escoria} = 915 \times 0,434 = 397,11 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ proveniente del arrabio} = 397,11 - 183 = 214,11 \text{ Kg.}$$

$$\text{Si en arrabio} = 214,11 \times 28/60 = 99,82 \text{ Kg.}$$

$$\text{Mn en arrabio} = 915 \times 0,254 \times 55/71 = 180,03 \text{ Kg.}$$

$$\begin{aligned} \text{C del CO} &= 3190 \times 0,162 \times 12/22,4 = 276,85 \text{ Kg.} \\ \text{C del CO}_2 &= 3190 \times 0,07 \times 12/22,4 = \underline{119,63 \text{ Kg.}} \\ \text{C del arrabio} &= 396,48 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

$$\text{Fe del arrabio} = 10000 - 99,92 - 180,03 - 396,48 = 9323,57 \text{ Kg.}$$

Composición del arrabio (8-1)

$$\begin{aligned} \text{Fe} &= 9323,57 \text{ Kg.} = 93,23\% \\ \text{Si} &= 99,82 \text{ Kg.} = 1,00\% \\ \text{Mn} &= 180,03 \text{ Kg.} = 1,80\% \\ \text{C} &= \underline{396,48 \text{ Kg.}} = \underline{3,97\%} \\ &\underline{10000,00} \quad \underline{100,00\%} \end{aligned}$$

2

Método del N₂:

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = \text{N}_2 \text{ en sople}$$

$$\text{N}_2 \text{ en gas} = 3190 \times 0,768 = 2449,92 \text{ m}^3$$

$$\text{Sople} = 2449,92/0,79 = 3101 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire requerido para el soplado} = 3101 \text{ m}^3 \text{ (8-2)}$$

Método del O₂:

$$\begin{aligned} \text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{FeO} & \text{O}_2 &= 915 \times 0,312 \times 22,4/144 = 44,41 \text{ m}^3 \\ \text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{MnO} & \text{O}_2 &= 180,03 \times 22,4/110 = 36,66 \text{ m}^3 \\ \text{Si} + \text{O}_2 &= \text{SiO}_2 & \text{O}_2 &= 99,92 \times 22,4/28 = 79,94 \text{ m}^3 \\ \text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{CO} & \text{O}_2 &= 3190 \times 0,162/2 = 258,39 \text{ m}^3 \\ \text{C} + \text{O}_2 &= \text{CO}_2 & \text{O}_2 &= 3190 \times 0,07 = \underline{223,30 \text{ m}^3} \\ & & & \underline{642,70 \text{ m}^3} \end{aligned}$$

$$\text{Sople} = 642,70/0,21 = 3060 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire requerido para el soplado} = 3060 \text{ m}^3 \text{ (8-2)}$$

3.

Consideraciones

- Se supone que el aire debe estar húmedo.
- Si el tiempo de soplado no cambia, debe entrar en el mismo tiempo la misma cantidad de aire, pero húmedo.
- Como no se propone un porcentaje de saturación del aire, asumimos el 100%.

El cálculo del volumen de aire se hizo a condiciones normales. trabajaremos con condiciones dadas.

A 27°C, la presión máxima de saturación del agua es 26,7 mm.

Cambio de condiciones del aire:

$$\begin{aligned} V_1 &= 3101 \text{ m}^3 & V_2 &=? \\ P_1 &= 760 \text{ mm} & P_2 &= 740 \text{ mm} \\ T_1 &= 273 \text{ K} & T_2 &= 27 + 273 = 300 \text{ K} \\ V_2 &= V_1 \times (P_1/T_1) \times (T_2/P_2) = 3500 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volumen de H}_2\text{O} = 3500 \times 26,7/740 = 126,3 \text{ m}^3.$$

$$\text{Peso en Kg.} = \text{Vol. (m}^3) \times (\text{peso molecular}/2) \times 0,09.$$

$$\text{Peso del H}_2\text{O} = 126,3 \times 0,09 \times 18/2 = 102,3 \text{ Kg.}$$

$$\text{Aire seco} = 3500 - 126,3 = 3373,7 \text{ m}^3$$

$$H_2O = 102,3/3373,7 = 0,03$$

$$H_2O = 0,03 \text{ Kg./m}^3 \text{ de aire (8-3)}$$

4

Utilizando la fórmula adiabática.

$$W = 3,45 V_0 P_0 [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$V_0 = 3101 / 12 \times 60 = 4,31 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$P_0 = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm}$$

$$P_1 = 1 + 1,8 = 2,8 \text{ atm}$$

$$\text{Eficiencia} = 88\%$$

$$W = 3,45 \times 10333 \times [(2,8)^{0,29} - 1] = 53462,3 \text{ Kg m/seg}$$

$$\text{Potencia requerida por las máquinas de soplado} = 53462,3/102 \times 0,88 = 596 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia requerida por las máquinas de soplado} = 596 \text{ Kw. (8-4)}$$

EJERCICIO N°9 (7)

Un convertidor Bessemer básico procesa 20 toneladas cortas del siguiente arrabio

C	3,05%	S	0,33%
Mn	0,41	P	1,37
Si	0,83	Fe	94,01

Al final, del soplado el baño contiene 0,17% C, 0,10% Mn, 0,05% S, 0,06% P, 0% Si y totaliza 37000 libras

El carbono forma CO y CO₂ en la proporción de 4 : 1. Asumir que la oxidación del hierro ocurre los periodos segundo y tercero, y esta dividida entre ellos en proporción a su duración. El azufre es removido completamente como CaS, los gases no contienen O₂ ni SO₂.

Durante el soplado se corren 1200 libras de dolomita calcinada del revestimiento (asumir CaO-MgO) y en adición se adiciona suficiente CaO puro para producir una escoria con 67% CaO.

Las máquinas de soplado suministran aire a 26 psi de presión (manómetro), con un coeficiente de reparto de 94% y una eficiencia mecánica de 92%.

Las máquinas son de doble acción, 90 r.p.m., diámetro interno del cilindro de 3,6 ft longitud del embolo, 6,6 ft. El vástago (a través de ambos lados) tiene 6 pulgadas de diámetro.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado para el soplado.
2. El tiempo de cada periodo de soplado.
3. El porcentaje de eliminación de las impurezas y el porcentaje de pérdida del Fe.
4. El peso de la cal adicionada y de escoria producida.
5. La potencia requerida para poner en marcha las máquinas de soplado haciendo el cálculo por el método del diagrama teórico indicador.

SOLUCION

1.

$$\text{Arrabio} = 20 \times 2000 = 40000 \text{ libras.}$$

$$C = 40000 \times 0,0305 = 1220$$

$$Mn = 40000 \times 0,0041 = 164$$

$$Si = 40000 \times 0,0083 = 332$$

$$S = 40000 \times 0,0033 = 132$$

$$P = 40000 \times 0,0137 = 548$$

$$Fe = 40000 \times 0,9401 = 37604$$

Baño final = 37000 libras

$$C = 37000 \times 0,0017 = 62,9$$

$$Mn = 37000 \times 0,0010 = 37,0$$

$$S = 37000 \times 0,00055 = 20,35$$

$$P = 37000 \times 0,0006 = 22,2$$

$$Fe = 37000 \times 0,99615 = 36857,55$$

Elementos oxidados (libras):

$$C \text{ oxidado} = 1220 - 62,9 = 1157,1$$

$$C \rightarrow CO = 1157,1 \times 4/5 = 925,68$$

$$C \rightarrow CO_2 = 1157,1 \times 1/5 = 231,42$$

$$Mn \rightarrow MnO = 164 - 37 = 127$$

$$Si \rightarrow SiO_2 = 332$$

$$P \rightarrow P_2O_5 = 548 - 22,2 = 525,8$$

$$Fe \rightarrow FeO = 37604 - 36857,55 = 746,45$$

Reacciones de oxidación:

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO: O_2 = 925,68 \times 359/24 = 13846,63 \text{ ft}^3$$

$$C + O_2 = CO_2: O_2 = 231,42 \times 359/12 = 6923,32$$

$$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO: O_2 = 127 \times 359/110 = 414,48$$

$$Si + O_2 = SiO_2: O_2 = 332 \times 359/28 = 4256,71$$

$$2P + 5/2 O_2 = P_2O_5: O_2 = 525,8 \times 359 \times 2,5 / 62 = 7611,38$$

$$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO: O_2 = 746,45 \times 359/112 = 2392,64$$

$$O_2 \text{ de oxidaciones} = 35445,16 \text{ ft}^3$$

$$S \rightarrow CaS = 132 - 20,35 = 111,65 \text{ lbs.}$$

$$Ca \text{ para este} = 111,65 \times 40/32 = 139,6 \text{ lbs.}$$

$$O \text{ de este} = 139,6 \times 16/40 = 55,825 \text{ lbs.}$$

$$O_2 \text{ aportado por el CaO} = 55,825 \times 359/32 = 626,3 \text{ ft}^3$$

$$O_2 \text{ del soplo} = 35445,16 - 626,3 = 34818,9 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire utilizado para el soplado} = 34818,9/0,21 = 165804,3 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire utilizado para el soplado} = 165804,3 \text{ ft}^3 (9-1)$$

7

Para este cálculo se debe determinar primero el caudal de aire.

El volumen de aire también puede calcularse a partir de las dimensiones del cilindro y del recorrido del émbolo por minuto. Si se conocen la longitud y el diámetro del cilindro, se puede calcular su volumen sin embargo, a este cálculo hay que hacerle una corrección debido al espacio ocupado por el vástago o el pistón. El volumen multiplicado por las revoluciones por minuto de la máquina, y por 2 si es de doble acción, da como resultado el volumen de aire comprimido por minuto.

Coefficiente de reparto = 94%

r.p.m. = 90

Doble acción = 2

Cilindro: diámetro = 3,6 ft; radio = 1,8 ft

Longitud del émbolo (stroke) = 6,6 ft.

Vástago o pistón: diámetro = 6 pulgadas; radio = 3 pulgadas = 0,25 ft.

$$\text{Área del vástago} = \pi r^2 = \pi (0,25)^2 = 0,196 \text{ ft}^2$$

$$\text{Área del cilindro} = \pi \cdot (1,8)^2 = 10,179 \text{ ft}^2$$

$$\text{Corrección (área efectiva)} = 10,179 - 0,196 = 9,983 \text{ ft}^2$$

$$\text{Volumen efectivo} = 9,983 \times 6,6 = 65,8878 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire comprimido} = \text{caudal de aire} = 65,8878 \times 2 \times 90 \times 0,94 = 11148 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\text{Caudal de O}_2 = 11148 \times 0,21 = 2341,08 \text{ ft}^3/\text{min.}$$

Cálculo del tiempo de los periodos.

1° periodo = oxidación del Mn y el Si.

$$t_1 = (414,48 + 4256,71) \text{ ft}^3 / 2341,08 \text{ ft}^3/\text{min.} = 1,995 \approx 2,0 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo del 1° periodo} = 2,0 \text{ min. (9-2)}$$

Para el 2° y 3° periodos, procedemos así:

2° periodo = descarbonación = oxidación del C y algo de Fe.

$$t_2 \text{ sin oxidación de Fe} = (13846,63 + 6923,32) / 2341,08 = 8,87 \text{ min.}$$

3° periodo = desfosforación = oxidación del P y algo de Fe.

$$t_3 \text{ sin oxidación de Fe} = 7611,38 / 2341,08 = 3,25 \text{ min.}$$

$$t_2 + t_3 \text{ sin oxidación de Fe} = 12,12 \text{ min.}$$

$$t(\text{Fe}) = 2392,64 / 2341,08 = 1,02 \text{ min.}$$

$$t_2 \text{ con oxidación de Fe} = 8,87 + 1,02 \times (8,87/12,12) = 9,62 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo del 2° periodo} = 9,62 \text{ min. (9-2)}$$

$$t_3 \text{ con oxidación de Fe} = 3,25 + 1,02 \times (3,25/12,12) = 3,52 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo del 3° periodo} = 3,52 \text{ min. (9-2)}$$

3

$$\text{Mn eliminado} = 127/164 = 0,774$$

$$\text{Mn eliminado} = 77,4\% \text{ (9-3)}$$

$$\text{Si eliminado} = 100\% \text{ (9-3)}$$

$$\text{C eliminado} = 1157,1/1220 = 0,948$$

$$\text{C eliminado} = 94,8\% \text{ (9-3)}$$

$$\text{S eliminado} = 111,65/132 = 0,846$$

$$\text{S eliminado} = 84,6\% \text{ (9-3)}$$

$$\text{P eliminado} = 525,8/548 = 0,959$$

$$\text{P eliminado} = 95,9\% \text{ (9-3)}$$

$$\text{Pérdida de Fe} = 746,45/37604 = 0,02$$

$$\text{Pérdida de Fe} = 2,0\% \text{ (9-3)}$$

4.

$$\text{Escoria} = \text{MnO} + \text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{FeO} + \text{CaO} + \text{CaS} + \text{MgO}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 100 - 67 = 33\%$$

$$\begin{aligned}
 \text{MnO} &= 127 \times 71.55 = 163.9 \text{ lbs.} \\
 \text{SiO}_2 &= 332 \times 60.28 = 711.4 \\
 \text{P}_2\text{O}_5 &= 525.8 \times 142.62 = 1204.3 \\
 \text{FeO} &= 746.45 \times 72.56 = 959.7 \\
 \text{CaS} &= 111.65 \times 72/32 = 251.2 \\
 \text{MgO} &= 1200 \times 40.96 = 500.0 \\
 \text{Escoria sin CaO} &= 3790.5 \text{ lbs.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 3790.5/0.33 = 11486.4 \text{ lbs.}$$

$$\text{Peso de la escoria} = 11486.4 \text{ lbs. (9-4)}$$

$$\text{CaO en escoria} = 11486.4 \times 0.67 = 7696 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaO de dolomita} = 1200 - 500 = 700 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaO para formar CaS} = 139.6 \times 56.40 = 195.44 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaO adicionado} = 7696 + 195.44 - 700 = 7191.44 \text{ lbs.}$$

$$\text{CaO adicionado} = 7191.44 \text{ lbs. (9-4)}$$

5

Hay que observar la Fig. #1.

$$1 \text{ Kw} = 1.341 \text{ H.P.}$$

$$1 \text{ m}^3 = 35.314 \text{ ft}^3$$

$$V_0 = \text{caudal} = 11148 \text{ ft}^3/\text{min.} = 5.261 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$P_0 = 14.7 \text{ psi.}$$

$$P_1 = P_0 + P (\text{manómetro}) = 14.7 + 26 = 40.7 \text{ psi.}$$

La presión P se alcanza cuando la base del rectángulo (x_D) es = 14.7/40.7 y la del triángulo (A_x) es = 26/40.7. La altura de c/u de ellos es = $P_1 - P_0 = 26$

$$\text{Area del rectángulo} = 26 \times (14.7/40.7) = 9.39$$

$$\text{Area del triángulo} = \frac{1}{2} \times 26 \times (26/40.7) = 8.30$$

$$\text{Area total} = 17.69 \text{ psi.} = 17.69/14.7 = 1.204 \text{ atm.}$$

$$\text{Potencia} = 5.261 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \times 1.204 \text{ atm.} \times 10333 \frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2} \times \frac{1}{\text{atm.}}$$

$$= 65452 \frac{\text{Kg. m}}{\text{seg.}}$$

$$\text{Potencia} = 65452 / 102 \times 0.92 = 697.5 \text{ Kw.}$$

$$\text{Potencia} = 697.6 \times 1.341 = 935.3 \text{ H.P.}$$

$$\text{Potencia requerida para máquinas de soplado} = 935.3 \text{ H.P. (9-5)}$$

EJERCICIO N°10 (7)

Un convertidor bessemer basico procesa 15 toneladas de un arrabio que contiene

$$\begin{aligned}
 \text{C} & 3.6\% \\
 \text{Mn} & 0.9 \\
 \text{Si} & 0.7 \\
 \text{P} & 2.2
 \end{aligned}$$

Se oxidan también Fe equivalente al 3,6% de peso del arrabio, siendo uniformemente distribuido a través del soplado. Tres cuartos de carbono pasan a CO y el resto a CO₂. Se adiciona suficiente lima (CaO) como para producir una escoria con 10% SiO₂.

La presión de soplado es de 1,7 atmósferas (manómetro). Las máquinas de soplado trabajan a 90 r.p.m.

El diámetro interno del cilindro es de 1,0 m, la longitud o carrera del émbolo (stroke) es de 2 m. La máquina es de doble acción. El vástago o pistón (a través de ambos lados) tiene un diámetro de 15 cm.

La eficiencia mecánica de la máquina es de 92% y el coeficiente de reparto del aire es del 88%.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado para el soplado, a condiciones normales.
2. El tiempo de soplado, por periodo.
3. El peso de la lima adicionada.
4. La potencia requerida por las máquinas de soplado.
5. El tiempo total de soplado si se introduce en el sople 0,02 Kg. de vapor por metro cubico de aire para limitar la elevación de temperatura en el convertidor.

SOLUCION

1.

$$\text{Arrabio} = 15 \times 1000 = 15000 \text{ Kg}$$

$$C = 0,036 \times 15000 = 540$$

$$Mn = 0,009 \times 15000 = 135$$

$$Si = 0,007 \times 15000 = 105$$

$$P = 0,022 \times 15000 = 330$$

$$Fe = 0,926 \times 15000 = 13890$$

$$C \rightarrow CO = 540 \times \frac{3}{4} = 405 \text{ Kg}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 540 \times \frac{1}{4} = 135 \text{ Kg}$$

$$Fe \rightarrow FeO = 15000 \times 0,036 = 540 \text{ Kg}$$

Oxidaciones

Se asume que se oxidan todas las impurezas

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO; O_2 = 405 \times \frac{22,4}{24} = 378,0 \text{ m}^3$$

$$C + O_2 = CO_2; O_2 = 135 \times \frac{22,4}{12} = 252,0$$

$$Mn + \frac{1}{2} O_2 = MnO; O_2 = 135 \times \frac{22,4}{110} = 27,7$$

$$Si + O_2 = SiO_2; O_2 = 105 \times \frac{22,4}{28} = 84,0$$

$$2P + 2,5 O_2 = P_2O_5; O_2 = 330 \times \frac{2,5 \times 22,4}{2 \times 31} = 298,1$$

$$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO; O_2 = 540 \times \frac{22,4}{112} = 108,0$$

$$O_2 \text{ de reacciones de oxidación} = 1147,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1147,6 / 0,21 = 5464,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire utilizado para el soplado} = 5464,8 \text{ m}^3 (10-1)$$

2.

Hay que determinar primero el caudal.

$$\text{Presión manométrica (gage)} = 1,7 \text{ atm.}$$

$$\text{r.p.m.} = 90$$

$$\text{Diámetro del cilindro} = 1,0 \text{ m., radio} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Carrera del émbolo (stroke)} = 2,0 \text{ m}$$

$$\text{Doble acción} = 2$$

$$\text{Diámetro del vástago} = 15 \text{ cm.} = 0,15 \text{ m., radio} = 0,075 \text{ m}$$

$$\text{Eficiencia} = 92\%$$

Coefficiente de reparto = 88%

Partiendo de las mismas observaciones que se hicieron en el punto 2 del ejercicio #9

Basta recordar que el volumen multiplicado por la r.p.m. de la máquina y por 2 si es de doble acción, da como resultado el volumen de aire comprimido por minuto.

$$\text{Area del cilindro} = \pi r^2 = \pi \cdot (0,5)^2 = 0,785 \text{ m}^2.$$

$$\text{Area del vástago (pistón)} = \pi \cdot (0,075)^2 = 0,0177 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen corregido} = 2 \times (0,785 - 0,0177) = 1,535 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire comprimido} = \text{caudal} = 1,535 \times 90 \times 2 \times 0,88 = 243,1 \text{ m}^3/\text{min.}$$

$$\text{Caudal de O}_2 = 243,1 \times 0,21 = 51,07 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Calculo de los tiempos por periodo

1º periodo = desiliciación (oxidación de Si, Mn y algo de Fe).

$$t_1 \text{ sin Fe} = (27,5 + 84)/51,07 = 2,18 \text{ min.}$$

2º periodo = descaburación (oxidación del C y algo de Fe)

$$t_2 \text{ sin Fe} = (378 + 252)/51,07 = 12,34 \text{ min.}$$

3º periodo = desfosforación (oxidación del P y algo de Fe).

$$t_3 \text{ sin Fe} = 298,1/51,07 = 5,84 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo total sin Fe} = 20,36 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo de oxidación del Fe} = 108/51,07 = 2,11 \text{ min.}$$

Tiempo de soplado por periodo (10-2)

$$1^\circ \text{ periodo} = 2,18 + 2,11 \times (2,18/20,36) = 2,4 \text{ min}$$

$$2^\circ \text{ periodo} = 12,34 + 2,11 \times (12,34/20,36) = 13,6 \text{ min.}$$

$$3^\circ \text{ periodo} = 5,84 + 2,11 \times (5,84/20,36) = 6,4 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo total de soplado} = 22,4 \text{ min.}$$

3.



$$\text{SiO}_2 = 105 \times 60/28 = 225,0 \text{ Kg.}$$

$$\text{MnO} = 135 \times 71/55 = 174,3$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 330 \times 142/62 = 755,8$$

$$\text{FeO} = 540 \times 72/56 = 694,3$$

$$\text{Escoria total} = 225,0 + 174,3 + 755,8 + 694,3 = 2250 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO} = 2250 - 225 - 174,3 - 755,8 - 694,3 = 400,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO adicionado} = 400,6 \text{ Kg. (10-3)}$$

4

Utilizando el método adiabático

$$W = 3,45 V_0 P_0 [(P_1/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$V_0 = 243,2 \frac{\text{m}^3}{\text{min.}} \times \frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ seg.}} \times \frac{1}{0,88} = 4,602 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}}$$

$$P_0 = 14,7 \text{ psi.} = 1 \text{ atm}$$

$$P_1 = P_0 + P (\text{gage}) = 1 + 1,7 = 2,7 \text{ atm.}$$

$$W = 3,45 \times 4,602 \frac{m^3}{seg.} \times 1 atm. \times 10333 \frac{kg}{m^2} \times \frac{1}{atm.} \left[(2,7)^{20} - 1 \right]$$

$$= 54764,3 \frac{Kg \cdot m}{seg.}$$

$$W = 54764,3 / 102 \times 0,92 = 584 Kw.$$

Potencia requerida por las maquinas de soplado = 584 Kw (10-4)

5.

$$\text{Soplo} = 5464,8 m^3$$

$$\text{Vapor de } H_2O = 5464,8 \times 0,02 = 109,3 Kg. = 136 m^3$$

$$\text{Aire seco necesario} = 5464,8 + 136 = 5328,8 m^3$$

$$\text{El caudal de } H_2O \text{ será} = 243,2 \times 0,02 \times 22,4/18 = 6,05 m^3/min$$

$$\text{Caudal total} = 243,2 + 6,05 = 249,3 m^3/min.$$

$$\text{Tiempo total de soplado} = 5328,8 / 249,3 = 21,4 min$$

$$\text{Tiempo total de soplado} = 21,4 min. (10-5)$$

EJERCICIO N°11 (7)

El gas producido en un productor de gas tiene el siguiente análisis:

CO	27%
CO ₂	3
CH ₄	2
H ₂	6
N ₂	62

Este gas es quemado en un horno con 20% de aire en exceso. Los productos de combustión salen del horno a 327°C. Y la chimenea a 327°C. Temperatura atmosférica: 10°C. barometro. 765 mm. El gas es quemado a una rata de 1 metro cubico por segundo. La chimenea tiene un diámetro uniforme de 1 metro y una altura de 20 metros.

PREGUNTAS

1. La velocidad de los productos de combustión, en el fondo y en la parte alta de la chimenea.
2. El poder de levantamiento total (lifting power) de los gases en la chimenea, en kilogramos.
3. El tiro (corriente de aire = chimney draft) de la chimenea, en centímetros y en pulgadas de agua.
4. La diferencia total de nivel de la columna de gas (total head) de la chimenea, en metros y en pies de aire a condiciones normales.
5. La eficiencia termomecánica de la chimenea.

SOLUCION

1.

Para este calculo es necesario determinar el volumen de los productos de combustión resultantes de quemar 1 m³ de gas:

Reacciones	Productos de combustión (m ³ /m ³ de gas)			
	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
1	0,135	0,27	---	0,508
2	---	0,03	---	---
3	0,040	0,02	0,04	0,150
4	0,030	---	0,06	0,113
5	---	---	---	0,620
6	0,205	0,32	0,10	1,391

$$\text{Aire teórico} = 0,205/0,21 = 0,976 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire total} = 0,976 \times 1,2 = 1,1712 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso} = 1,1712 - 0,976 = 0,1952 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ en exceso} = 0,1952 \times 0,21 = 0,041 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ total} = 1,1712 \times 0,79 + 0,62 = 1,5452 \text{ m}^3$$

Volumen y composición de los productos de combustión:

$$\text{O}_2 = 0,0410 \text{ m}^3 = 2,04\%$$

$$\text{CO}_2 = 0,3200 = 15,95\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,1000 = 4,99\%$$

$$\text{N}_2 = \frac{1,5452}{2,0062} = 77,02\%$$

Estos productos de combustión se encuentran a condiciones normales y como son productos de la combustión de 1 m³ de gas/seg., su caudal será = 2,0062 m³/seg.

Cambio de condiciones

$$V_1 = 2,0062 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$V_2 = ?$$

$$P_1 = 760 \text{ mm}$$

$$P_2 = 765 \text{ mm}$$

$$T_1 = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 377 + 273 = 650 \text{ K}$$

$$V_2 = V_1 \times (P_1/P_2) \times (T_2/T_1) = 4,745 \text{ m}^3/\text{seg.} \text{ (esto sucede en el fondo de la chimenea)}$$

Para el tope de la chimenea:

$$V_2 = 2,0062 \times (760/765) \times (600/273) = 4,380 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Volumen por unidad de tiempo = área x velocidad

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo} \times \text{Area}}$$

$$\text{Area de la chimenea} = \pi \cdot (0,5)^2 = 0,785 \text{ m}^2 \therefore$$

$$\text{Velocidad en el fondo} = 4,745/0,785 = 6,04 \text{ m/seg.}$$

$$\text{Velocidad de los P.C en el fondo de la chimenea} = 6,04 \text{ m/seg. (11-1)}$$

$$\text{Velocidad en el tope} = 4,380/0,785 = 5,58 \text{ m/seg.}$$

$$\text{Velocidad de los P.C. en el tope de la chimenea} = 5,58 \text{ m/seg. (11-1)}$$

2

Existe una corriente natural de gas (draft) en debido a la diferencia en peso entre una columna de gas en la chimenea y una columna igual de aire exterior. La columna de gas en la chimenea y la columna exterior de aire de igual altura y sección transversal, se puede asumir que ocupan los dos tercios del tubo en el estado más frío y por tanto el más pesado, empuja al más ligero o liviano hacia arriba con una fuerza igual a la diferencia en peso entre las dos columnas. Esta diferencia en peso se conoce como potencia de levantamiento (lifting power) del gas.

Determinamos el peso de 1 m³ de productos de combustión.

$$O_2 = 0,0204 \times 32/22,4 = 0,0291 \text{ Kg.}$$

$$CO_2 = 0,1595 \times 44/22,4 = 0,3133$$

$$H_2O = 0,0499 \times 18/22,4 = 0,0401$$

$$N_2 = 0,7702 \times 28/22,4 = 0,9627$$

$$\text{Peso de 1 m}^3 \text{ de P.C} = 1,3452 \text{ Kg.}$$

A condiciones normales:

$$\text{Volumen de una columna de gas en chimenea} = \pi (0,5)^2 \times 20 = 15,708 \text{ m}^3$$

$$\text{Temperatura promedio en la chimenea} = \frac{1}{2} \times (377 + 327) = 352^\circ\text{C} = 625\text{K}$$

Llevamos este volumen a C.N

$$\text{Volumen del gas} = 15,708 \times (273/625) \times (765/760) = 6,906 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de este} = 6,906 \text{ m}^3 \times 1,3452 \text{ Kg./m}^3 = 9,29 \text{ Kg.}$$

Si asumimos el mismo volumen pero para una columna de aire seco, a las condiciones dadas, tendríamos:

$$T_2 = 273 - 10 = 263\text{K}$$

$$\text{Volumen del aire} = 15,708 \times (273/263) \times (765/760) = 16,41 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidad del aire} = 1,293$$

$$\text{Peso del aire} = 16,41 \times 1,293 = 21,22 \text{ Kg.}$$

$$\text{Poder de levantamiento} = 21,22 - 9,29 = 11,93 \text{ Kg.}$$

$$\text{Poder de levantamiento} = 11,93 \text{ Kg. (11-2)}$$

3.

$$1 \text{ atm.} = 760 \text{ mm} = 33,9 \text{ pies de agua} = 10333 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Tiro (corriente de aire)} = \frac{\text{Poder de levantamiento}}{\text{Area de la chimenea}}$$

$$\text{Area de la chimenea} = \pi \cdot (0,5)^2 = 0,785 \text{ m}^2$$

$$\text{Tiro (draft)} = 11,93 / 0,785 = 15,20 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Tiro} = 15,2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times \frac{33,9 \text{ ft. de H}_2\text{O}}{10333 \frac{\text{Kg.}}{\text{m}^2}} \times \frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft.}} \times \frac{2,54 \text{ cm}}{1 \text{ in.}} = 1,52$$

$$\text{Tiro (draft)} = 1,52 \text{ cm de H}_2\text{O (11-3)}$$

$$\text{Tiro} = 1,52 \text{ cm.} \times 1 \text{ in./2,54 cm.} = 0,60$$

$$\text{Tiro (draft)} = 0,60 \text{ in. de H}_2\text{O (11-3)}$$

4.

Puesto que una presión por unidad de área se puede expresar como la altura de una columna de líquido, el tiro de una chimenea es equivalente a su diferencia de nivel (chimney head) y en esta altura de una columna de líquido (o gas) igual a una presión dada. En el caso del sistema chimenea-gas, la diferencia de nivel (head) se expresa en pies o metros de agua, a condiciones normales.

1 pies de aire = $12 \times 0.001293 = 0.015516$ pulgadas de agua.

Si tomamos el tiro ya calculado tendremos:

Diferencia total de nivel (total head) = $0.60/0.015516 = 38.66$

Diferencia total de nivel = 38,7 ft. de aire (11-4)

Diferencia total de nivel = 38,66 ft. de aire $\cdot \frac{12 \text{ in.}}{1 \text{ ft.}} \cdot \frac{2.54 \text{ cm.}}{1 \text{ in.}} \cdot \frac{1 \text{ m.}}{100 \text{ cm.}}$
 = 11,75 m de H_2O

Diferencia total de nivel = 11,75 m. de H_2O (11-4)

5

Para encontrar la rata de trabajo o potencia de la chimenea, procedemos así:

Caudal promedio del gas en la chimenea = $\frac{1}{2} \times (4.745 + 4.380) = 4.5625 \text{ m}^3/\text{seg.}$

Peso del gas = 9,29 (ya calculado).

Area de la chimenea = $\pi \cdot (0.5)^2 = 0.785 \text{ m}^2$

Potencia de la chimenea = (caudal \times peso) / área

= $4.5625 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}} \times \frac{9.29 \text{ Kg.}}{0.785 \text{ m}^2} = 54 \frac{\text{Kg.m}}{\text{seg.}}$

1 Kw = 102 Kg.m/seg.

Potencia de la chimenea = $54/102 = 0.53 \text{ Kw.}$

Comparamos esto con el contenido de calor de los gases:

Los gases se encuentran a C N con un V = $2.0062 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y los vamos a llevar a la temperatura promedio de 352°C , así:

$O_2 + N_2 = 0.7702 + 0.0204 = 0.7906$

$O_2 + N_2 = 0.7906 \times (0.302 + 2.2 \times 10^{-5} t) \cdot t$

$H_2O = 0.0499 \times (0.373 + 5.0 \times 10^{-5} t) \cdot t$

$CO_2 = 0.1595 \times (0.406 + 9.0 \times 10^{-5} t) \cdot t$

Contenido de calor en los gases a cualquier "t" $\frac{0.3221 t + 3.4243 \times 10^{-3} t^2}{2}$

Si $t = 352^\circ\text{C}$; contenido de calor = 117.6 Kcal./m^3

Contenido de calor = $117.6 \text{ Kcal./m}^3 \times 2.0062 \text{ m}^3/\text{seg.} = 235.2 \text{ Kcal./seg.}$
 = 846720 Kcal /hr.

1 Kw = 860 Kcal /hr

Potencia del gas = $846720/860 = 984.6 \text{ Kw.}$

Eficiencia termomecánica de la chimenea = $0.53/984.6 = 0.00054$

Eficiencia termomecánica de la chimenea = 0,054% (11-5)

EJERCICIO N°12 (7)

El gas obtenido de un productor de gas, fue quemado a la rata de 1 metro cubico por segundo con 10% de aire en exceso, ambos, el aire y el gas fueron precalentados a 1000°C produciendo por metro cubico de gas quemado, un producto de combustion que contenia 0,3 m³ de CO, 0,18 m³ de H₂O, 0,02 m³ de O₂, y 1,44 m³ de N₂. La intensidad calorica (temperatura de la llama) fue de 2000°C. La potencia calorifica del gas fue de 1145 Kcal. m³. El contenido de calor en el gas precalentado fue de 358 Kcal y en el aire de 365 Kcal.

Las medidas de temperatura en el horno, presentaron los siguientes resultados:

Al final de la llama (cerca de los quemadores), 1900°C

Al final del cañon de la chimenea (entrada a los recuperadores), 1650°C

Dejando los recuperadores y entrando a la caldera para perdidas de calor, 750°C

Dejando la caldera y entrando a la chimenea, 350°C.

Saliendo de la chimenea, 250°C.

La chimenea tenia 50 metros de altura y una seccion transversal uniforme de 1 m². La velocidad de los gases en la chimenea fue de 5 m/seg.

PREGUNTAS

1. El porcentaje del calor total que entra al horno, que es:
 - a) Perdido en la combustion
 - b) Utilizado en el horno.
 - c) Extraido en los recuperadores.
 - d) Extraido en la caldera.
 - e) Perdido en la chimenea.
2. La eficiencia de los recuperadores.
3. El porcentaje del calor que entra a los recuperadores que es retenido en ellos
4. El tiro (draft) en la chimenea, en milímetros de mercurio.
5. La eficiencia termomecánica de la chimenea.

SOLUCION

1.

El calor total esta representado por la potencia calorifica del combustible + precalentamiento del aire + precalentamiento del combustible.

$$\text{Calor total} = 1145 + 358 + 365 = 1868 \text{ Kcal. / m}^3 \text{ de combustible}$$

Vamos a determinar el contenido de calor de los productos de combustion, a cualquier temperatura

$$\begin{aligned} \text{N}_2 + \text{O}_2 &= 1,46 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-3} t) \cdot t = 0,441 t + 3,212 \times 10^{-3} t^2 \\ \text{CO}_2 &= 0,31 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-3} t) \cdot t = 0,126 t + 2,790 \times 10^{-3} t^2 \\ \text{H}_2\text{O} &= 0,18 \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-3} t) \cdot t = 0,067 t + 9,000 \times 10^{-4} t^2 \\ &= 0,634 t + 6,902 \times 10^{-3} t^2 \end{aligned}$$

Contenido de calor cuando:

$$\begin{aligned} t = 1900^\circ\text{C}: \text{ contenido de calor} &= 1453,8 \text{ Kcal} \\ t = 1650^\circ\text{C}: \text{ contenido de calor} &= 1234,0 \\ t = 750^\circ\text{C}: \text{ contenido de calor} &= 514,3 \\ t = 350^\circ\text{C}: \text{ contenido de calor} &= 230,4 \\ t = 250^\circ\text{C}: \text{ contenido de calor} &= 162,8 \end{aligned}$$

$$\text{a) Calor perdido en la combustion} = (1868 - 1453,8) / 1868 = 0,222$$

$$\text{a) Calor perdido en la combustion} = 22,2\% \text{ (12-1 a)}$$

$$b) \text{ Calor utilizado en el horno} = (1453,8 - 1234,0) / 1868 = 0,118$$

$$b) \text{ calor utilizado en el horno} = 11,8\% (12-1.b)$$

$$c) \text{ Calor extraído en los recuperadores} = (1234 - 514,3) / 1868 = 0,385$$

$$\text{Calor extraído en los recuperadores} = 38,5\% (12-1.c)$$

$$d) \text{ Calor extraído en la caldera} = (514,3 - 230,4) / 1868 = 0,152$$

$$\text{Calor extraído en la caldera} = 15,2\% (12-1.d)$$

$$e) \text{ Calor perdido en la chimenea} = 230,4 / 1868 = 0,123$$

$$\text{Calor perdido en la chimenea} = 12,3\% (12-1.e)$$

$$2$$

$$\text{Calor que entra a los recuperadores} = 1234,0 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor que sale de los recuperadores} = 514,3 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Eficiencia de los recuperadores} = (1234 - 514,3) / 1234 = 0,583$$

$$\text{Eficiencia de los recuperadores} = 58,3\% (12-2)$$

$$3$$

$$\text{Calor retenido en los recuperadores} = (1234 - 514,3) / 1234 = 0,583$$

$$\text{Calor retenido en los recuperadores} = 58,3\% (12-3)$$

4

Debido a que una presión por unidad de área puede ser expresada como la altura de una columna de líquido, el tiro de una chimenea es equivalente a su diferencia de nivel siendo esta igual a la altura de una columna de líquido o gas igual a una presión dada

Si esta altura la expresamos en unidades de presión, tendremos

Determinación del peso de 1 m³ de gas:

$$\text{CO}_2 = 0,31 \text{ m}^3 = 15,9\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,18 \text{ m}^3 = 9,2\%$$

$$\text{O}_2 = 0,02 \text{ m}^3 = 1,0\%$$

$$\text{N}_2 = 1,44 \text{ m}^3 = 73,9\%$$

$$1,95 \text{ m}^3 = 100,0\%$$

Si asumimos 1 m³ de este gas:

$$\text{CO}_2 = 0,159 \times 44/22,4 = 0,3123 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,092 \times 18/22,4 = 0,0739 \text{ Kg.}$$

$$\text{O}_2 = 0,010 \times 32/22,4 = 0,0143 \text{ Kg.}$$

$$\text{N}_2 = 0,739 \times 28/22,4 = 0,9238 \text{ Kg.}$$

$$1,3243 \text{ Kg.}$$

1 m³ de este gas pesa 1,3243 Kg.

La altura de la columna es = 50 m.

Sección transversal = 1 m²

Temperatura promedio en la chimenea = $\frac{1}{2} (350 + 250) = 300^\circ\text{C} = 573\text{K}$

Volumen de gas en la columna = 1 x 50 = 50 m³

Expresado en C.N.

Peso del gas = 50 x (273/573) x 1,3243 = 31,55 Kg.

Presión = 31,55 Kg / 1 m² = 31,55 Kg./m²

760 mm de presión = 10333 Kg./m²

$$\text{Tiro} = 31,55 \times (760/10333) = 2,32$$

$$\text{Tiro en la chimenea} = 2,32 \text{ mm, Hg. (12-4)}$$

5.

$$\text{Temperatura promedio en la chimenea} = 300^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{Contenido de calor de los P C a esta temperatura} &= \cdot (230,4 + 162,8) = 196,6 \text{ Kcal. seg} \\ &= 196,6 \times 3600 = 707760 \text{ Kcal./hr.} \end{aligned}$$

$$\text{Potencia} = 707760 / 860 = 823 \text{ Kw.}$$

$$\text{Tiro} = 31,55 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{Flujo} = 5 \text{ (m/seg)} \times 1 \text{ m}^2 = 5 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$\text{Trabajo realizado} = 31,55 \text{ (Kg./m}^2) \times 5 \text{ (m}^3/\text{seg.)} = 157,75 \text{ kg. m/seg.}$$

$$1 \text{ Kw} = 102 \text{ Kg. m/seg.}$$

$$\text{Potencia} = 157,75 / 102 = 1,55 \text{ Kw.}$$

$$\text{Eficiencia termomecánica} = 1,55/823 = 0,00188$$

$$\text{Eficiencia termomecánica en la chimenea} = 0,188\% \text{ (12-5)}$$

CAPITULO X
BALANCE DE CALOR

EJERCICIO N°1 (9)

Al efectuar un proceso determinado, se suministran a un sistema 500 BTU de calor y el sistema aumenta su volumen en 4 pies cúbicos.

La presión en el sistema es constante e igual a 1 atmósfera.

PREGUNTAS

1. Calcular el trabajo realizado, en libras-pié.
2. El cambio de calor a presión constante.
3. El cambio de calor a volumen constante.

SOLUCION

1.

El trabajo presión - volumen se calcula mediante la siguiente expresión

$$W = P\Delta V \quad (1)$$

Donde:

W = trabajo

P = presión

ΔV = cambio en volumen.

Vamos a llevar el cambio de volumen a litros:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ lts.} = 35,314 \text{ ft}^3$$

$$1 \text{ litro} = 35,314/1000 = 3,5314 \times 10^{-2} \text{ ft}^3$$

$$W = 1 \text{ atm} \times 4 \text{ ft}^3 \times \frac{1 \text{ lts}}{3,5314 \times 10^{-2} \text{ ft}^3} = 113,27 \text{ lts} \cdot \text{atm.}$$

$$1 \text{ caloria} = 3,091 \text{ libra-pié}$$

$$W = 113,27 \text{ lts} \cdot \text{atm} \times \frac{1,987 \text{ cal}}{0,082 \text{ lts} \cdot \text{atm.}} \times \frac{3,091 \text{ lbs} \cdot \text{ft}}{1 \text{ cal}} = 8483,91 \text{ lb} \cdot \text{ft.}$$

$$\text{Trabajo} = 8483,91 \text{ lb} \cdot \text{ft} \quad (1-1)$$

2.

Si q = calor,

ΔH = cambio de entalpía = q , cuando el proceso se realiza a presión constante como es este caso, por tanto:

$$\Delta H = q = 500 \text{ BTU}$$

$$\text{Cambio de calor a presión constante} = 500 \text{ BTU} \quad (1-2)$$

3.

El cambio de calor a volumen constante, se determina en base a la Primera Ley de la Termodinámica, que se expresa de la manera siguiente:

$$\Delta U = q - W \quad (2)$$

Donde:

ΔU = cambio de calor a volumen constante = energía interna del sistema

$$1 \text{ caloria} = 3,968 \times 10^{-1} \text{ BTU}$$

$$W = 8483,91 \text{ lb} \cdot \text{ft} \frac{1 \text{ cal.}}{3,091 \text{ lb} \cdot \text{ft}} \times \frac{3,968 \times 10^{-3} \text{ BTU}}{1 \text{ cal.}} = 10,89 \text{ BTU}$$

$$\Delta U = 500 - 10,89 = 489,11 \text{ BTU}$$

$$\Delta U = \text{cambio de calor a volumen constante} = 489,11 \text{ BTU (1-3)}$$

EJERCICIO N°2 (9)

Un motor de corriente continua opera regularmente a 115 voltios y 25 amperios, y proporciona 3,2 H.P a través de su eje.

PREGUNTAS

1. ¿Cuanto calor es disipado por el motor a sus alrededores, en BTU por hora?

SOLUCION

1.

Trabajo eléctrico es el que se realiza por el paso de una corriente eléctrica, en un circuito de corriente continua simple, se mide por el producto del voltaje por la corriente

$$W (\text{eléctrico}) = I \times V = 25 \times 115 = 2875 \text{ watts,} = 2,875 \text{ Kw.}$$

$$1 \text{ Kw} = 1,341 \text{ H.P}$$

$$1 \text{ H.P} = 42,44 \text{ BTU/min.} = 42,44 \times 60 = 2546,4 \text{ BTU/hr.}$$

$$W' (\text{eléctrico}) = 2,875 \text{ Kw} \frac{1,341 \text{ H.P}}{\text{Kw}} \times \frac{2546,4 \text{ BTU}}{\text{H.P} \text{ hr}} = 9817,33 \text{ BTU/hr.}$$

$$W' \text{ proporcionado a través del eje} = 3,2 \text{ H.P} \frac{2546,4 \text{ BTU}}{\text{H.P} \text{ hr}}$$

$$= 8148,48 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$\text{Calor disipado} = 9817,33 - 8148,48 = 1668,85 \text{ BTU/hr.}$$

$$\text{Calor disipado} = 1668,85 \text{ BTU/hr. (2-1)}$$

EJERCICIO N°3 (9)

15000 pies cúbicos por minuto de gases productos de combustión que analizaron 74% N₂, 14% CO₂, 10% H₂ y 2% O₂, pasa por una caldera para calor residual que los entra desde 2050°F a 560°F

PREGUNTAS

1. Calcular los caballos ingleses (BHP) equivalentes al calor liberado por estos productos de combustión en la caldera.

SOLUCION

1

$$2050^\circ\text{F} = 5/9 \times (2050 - 32) = 1121,11^\circ\text{C}$$

$$560^\circ\text{F} = 5/9 \times (560 - 32) = 293,33^\circ\text{C}$$

$$1 \text{ caballo caldera} = 140,7 \text{ Kcal./min.}$$

$$1 \text{ m}^3 = 35,314 \text{ ft}^3$$

$$\text{Productos de combustión} = 15000 / 35,314 = 424,76 \text{ m}^3/\text{min.}$$

$$\text{N}_2 = 424,76 \times 0,74 = 314,32 \text{ m}^3/\text{min.}$$

$$\text{CO}_2 = 424,76 \times 0,14 = 59,47$$

$$\text{H}_2 = 424,76 \times 0,10 = 42,48$$

$$\text{O}_2 = 424,76 \times 0,02 = 8,50$$

Contenido de calor de los productos de combustión a 1121,11°C:

$$\begin{aligned} \text{N}_2 + \text{O}_2 &= 322,82 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1121,11) \times 1121,11 = 118225 \text{ Kcal./min.} \\ \text{CO}_2 &= 59,47 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1121,11) \times 1121,11 = 33796 \text{ " } \\ \text{H}_2 &= 42,48 \times (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 1121,11) \times 1121,11 = 15403 \text{ " } \\ \text{Total contenido de calor a } 1121,11^\circ\text{C} &= 167424 \text{ Kcal./min.} \end{aligned}$$

Contenido de calor de los productos de combustión a 293,33°C:

$$\begin{aligned} \text{N}_2 + \text{O}_2 &= 322,82 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 293,33) \times 293,33 = 29208 \text{ Kcal./min.} \\ \text{CO}_2 &= 59,47 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 293,33) \times 293,33 = 7543 \text{ " } \\ \text{H}_2 &= 42,48 \times (0,301 + 2,0 \times 10^{-5} \times 293,33) \times 293,33 = 4824 \text{ " } \\ \text{Total contenido de calor a } 293,33^\circ\text{C} &= 40575 \text{ Kcal./min.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor liberado por los productos de combustión en la caldera} &= 167424 - 40575 \\ &= 126849 \text{ Kcal./min.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Calor liberado} &= 126849 \frac{\text{Kcal.}}{\text{min.}} \times \frac{1 \text{ B.H.P.}}{140,7 \frac{\text{Kcal.}}{\text{min.}}} = 901,6 \text{ B.H.P.} \\ \text{Calor liberado} &= 901,6 \text{ B.H.P. (3-1)} \end{aligned}$$

EJERCICIO N°4 (9)

Una carga de 20 toneladas de cobre líquido a 2350°F se enfría a 2200°F, añadiendo cobre sólido a 77°F. Supóngase que no hay pérdidas de calor.

PREGUNTAS

1. ¿Qué cantidad de cobre sólido debe usarse?
2. ¿Qué temperatura se alcanzaría si en su lugar se añadieran 2 toneladas de cobre sólido?

SOLUCION

De conformidad con el principio de conservación de la energía, el calor perdido por el cobre que se enfría hasta 2200°F, es el calor que gana el cobre que se calienta desde 77°F

Temperaturas.

$$\begin{aligned} 2350^\circ\text{F} &= 5/9 \times (2350 - 32) = 1287,8^\circ\text{C} \\ 2200^\circ\text{F} &= 5/9 \times (2200 - 32) = 1204,4^\circ\text{C} \\ 77^\circ\text{F} &= 5/9 \times (77 - 32) = 25^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Algunos datos para el cobre:

Temperatura de fusión = 1084°C

Calor latente de fusión = 57.6 lb.-cal./lb.

Contenido de calor total al punto de fusión (Q.L.M.P) = 172 lb-cal/lb

Calor específico del Cu. líquido = 0,112

Calor específico del Cu. sólido = $0,092 + 1,25 \times 10^{-5} t$

Para el cálculo de los contenidos de calor del material, usaremos la ecuación siguiente

$$Q = W \cdot C_m \cdot t \quad (3)$$

Q = calor absorbido o desprendido

W = peso del material

C_m = calor específico

t = temperatura, °C.

Peso de la carga = $20 \times 2000 = 40000$ lbs.

Contenido de calor en el cobre:

A 1287,8°C = $40000 \times 172 + 40000 \times 0,112 \times (1287,8 - 1084) = 7'793.024$ lb-cal

A 1204,4°C = $40000 \times 172 + 40000 \times 0,112 \times (1204,4 - 1084) = 7'419.392$ lb-cal.

Calor cedido por la carga, al pasar de 1287,8°C a 1204,4°C

= $7'793.024 - 7'419.392 = 373632$ lb-cal

Contenido de calor del cobre enfriador a 25°C

= $W \times (0,092 + 1,25 \times 10^{-5} \times 25) \times 25 = 2,308W$

Contenido de calor del cobre enfriador a 1204,4°C

= $W \times 172 + W \times 0,112 \times (1204,4 - 1084) = 185,485W$

Calor ganado por el cobre enfriador al pasar de 25°C a 1204,4°C

= $185,475W - 2,398W = 183,177W$

calor ganado = calor perdido

$183,177W = 373632$

$W = 373632/183,177 = 2040$

Peso del cobre sólido añadido = 2040 lbs. (4-1)

2.

Carga del enfriador = $2 \times 2000 = 4000$ lbs

Contenido de calor de la carga a la temperatura final "t"

= $40000 \times 172 + 40000 \times 0,112 \times (t - 1084) = 2'023.680 + 4480 t$

Calor perdido por la carga al pasar desde 1287,8°C a "t°C"

= $7'793.024 - (2'023.680 + 4480t) = 5'769.344 - 4480 t$

Contenido de calor del enfriador a 25°C

= $4000 \times (0,092 + 1,25 \times 10^{-5} \times 25) \times 25 = 9231$ lb-cal

Contenido de calor del enfriador a la temperatura "t"

= $4000 \times 172 + 4000 \times 0,112 \times (t - 1084) = 202368 + 448 t$

Calor ganado por el enfriador al pasar de 25°C a "t°C"

= $202368 + 448 t - 9231 = 193137 + 448 t$

$5'769.344 - 4480 t = 193137 + 448 t$

$$5'576.207 = 4928 \text{ t}$$

$$t = 5'576.207/4926 = 1131,5^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Temperatura alcanzada} = 1131,5^{\circ}\text{C} (4-2)$$

EJERCICIO N°5 (9)

El aire a 300°F y el carbono a 2000°F reaccionan para producir una mezcla de N_2 , CO_2 y C en exceso, teniendo la mezcla una temperatura de 2400°F

Hay presente un 100% de C en exceso.

El proceso se conduce a una presión constante de 1 atmósfera.

PREGUNTAS

1. Calcular el cambio de calor para este proceso, en BTU por libra de carbono inicialmente presente en el sistema y decir si esta cantidad de calor es absorbido o producido

SOLUCION

1.
Reacción:



$\text{C} = 1$ libra, C que reacciona = 0,5 libras = C en exceso.

$$\text{O} = 0,5 \times 16/12 = 0,667 \text{ lbs.}$$

$$\text{CO} = 0,5 \times 28/12 = 1,167 \text{ lbs.}$$

$$\text{N} = 0,667 \times 76,8/23,2 = 2,208 \text{ lbs.}$$

Contenido de calor en la carga.

El aire entra a 300°F

Las tablas de este libro no traen valores para el aire pero se puede determinar a través de oxígeno y el nitrógeno, para encontrar $H_1 - H_{77}$:

Hacemos una interpolación entre los siguientes valores:

Para el O_2

$$t = 200^{\circ}\text{F.} \quad H_1 - H_{77} = 870 \text{ BTU/lb.-mol}$$

$$t = 400^{\circ}\text{F.} \quad H_1 - H_{77} = 2320 \quad "$$

Interpolando, encontramos: $H_{300} - H_{77} = 1595 \text{ BTU/lb.-mol}$

$$H_{300} - H_{77} = 1595 (\text{BTU/lb.-mol}) \times 1 (\text{lb.-mol}/32 \text{ lbs}) \times 0,667 \text{ lbs} = 33,25 \text{ BTU}$$

Para el N_2 :

$$t = 200^{\circ}\text{F.} \quad H_1 - H_{77} = 860 \text{ BTU/lb.-mol}$$

$$t = 400^{\circ}\text{F.} \quad H_1 - H_{77} = 2260 \quad "$$

Interpolando: $H_{300} - H_{77} = 1560 \text{ BTU/lb.-mol}$

$$H_{300} - H_{77} = 1560 (\text{BTU/lb.-mol}) \times (1 \text{ lb.-mol}/28 \text{ lbs}) \times 2,208 \text{ lbs} = 123,02 \text{ BTU}$$

El carbono entra a 2000°F

Contenido de calor en el C

$$H_{2000} - H_{77} = 8550 \text{ (BTU/lb-mol)} \times (\text{mol}/12 \text{ lbs}) \times 1 \text{ lb.} = 712,5 \text{ BTU.}$$

Contenido de calor en la carga = $33,25 + 123,02 + 712,5 = 868,77 \text{ BTU por libra de C}$

Contenido de calor en los productos de combustión a 2400°F .

Para el CO:

$$t = 2000^\circ\text{F.} \quad H_t - H_{77} = 14700 \text{ BTU/mol.}$$

$$t = 2500^\circ\text{F.} \quad H_t - H_{77} = 18900 \text{ "}$$

$$\text{Interpolando: } H_{2400} - H_{77} = 18060 \text{ BTU/mol}$$

$$\text{Contenido de calor en el CO} = 18060 \times 1,167/28 = 752,72 \text{ BTU.}$$

Para el N₂:

$$t = 2000^\circ\text{F:} \quad H_t - H_{77} = 14600 \text{ BTU/mol.}$$

$$t = 2500^\circ\text{F:} \quad H_t - H_{77} = 18700 \text{ "}$$

$$\text{Interpolando: } H_{2400} - H_{77} = 17800$$

$$\text{Contenido de calor en el N}_2 = 17880 \times 2,208/28 = 1410 \text{ BTU.}$$

Para el C:

$$H_{2400} - H_{77} = 10800 \text{ BTU/mol.}$$

$$H_{2400} - H_{77} = 10800 \times 0,5/12 = 450 \text{ BTU}$$

$$\text{Contenido de calor en los productos de combustión} = 752,72 + 1410 + 450 = 2612,72 \text{ BTU}$$

$$\text{Calor de formación del CO (298K)} = -53280 \text{ BTU/lb-mol.}$$

$$\text{CO} = 1,167/28 = 0,042 \text{ lb.-mol}$$

$$\text{Calor de formación del CO} = -53280 \times 0,042 = -2221 \text{ BTU.}$$

El resultado para este proceso, por libra de C inicialmente cargado.

$$\text{Carga} = 868,77 \text{ BTU}$$

$$\text{Reacción} = 2221,00 \text{ BTU}$$

$$\text{Total calor aportado} = 3089,77 \text{ BTU}$$

$$\text{Calor entregado a los productos de combustión} = 2612,72 \text{ BTU}$$

El calor aportado siempre lleva signo negativo porque se le entrega a los alrededores al sistema

$$\text{Calor neto} = 2612,72 - 3089,77 = -477,05 \text{ BTU.}$$

$$\text{Cambio de calor} = 477,05 \text{ BTU (S-I)}$$

Este es un calor producido debido a que el sistema se lo entrega a los alrededores

EJERCICIO N°6 (9)

2000 kilogramos por hora de un concentrado de zinc húmedo (90% ZnS, 10% H₂O) se tostan con aire seco para producir ZnO sólido y un producto gaseoso contenido (base seco) 5% SO₂, balance N₂ y O₂.

Todo el S del ZnS que entra se convierte en SO₂.

Los materiales de alimentación están a 25°C y los productos (ZnO y gases) están a 427°C

PREGUNTAS

1. ¿Cuál es la velocidad de pérdida de calor desde el horno a los alrededores, en kilocalorías por hora?

SOLUCION

1

Carga (concentrado) = 2000 Kg./hr.

ZnS = 2000 x 0,9 = 1800 Kg./hr. = 18,48 moles/hr

H₂O = 2000 x 0,1 = 200 Kg./hr. = 11,11 "

Reacción de tostación:



O₂ = 1800 x 1,5 x 22,4/97,4 = 620,94 m³ = 887,06 Kg. = 27,72 moles.

ZnO = 1800 x 81,4/97,4 = 1504,3 Kg. = 18,48 moles.

SO₂ = 1800 x 64/97,4 = 1504,3 Kg. = 413,96 m³ = 18,48 moles.

Calculo de los gases:

N₂ teórico = 620,94 x 79/21 = 2336 m³

Aire teórico = 620,94 + 2336 = 2956,94 m³

Gas seco = SO₂ + N₂ total + O₂ en exceso

Gas seco, sin SO₂ = 100 - 5 = 95%

Gas total = 413,96/0,05 = 8279,2 m³

Aire exceso seco = gas total - SO₂ - N₂ teórico = 8279,2 - 413,96 - 2336 = 5529,24 m³

Gas húmedo

N₂ = 2336 + 5529,24 x 0,79 = 6704,10 m³ = 78,61%

O₂ = 5529,24 x 0,21 = 1161,14 = 13,62%

H₂O = 200 x 22,4/18 = 248,89 = 2,97%

SO₂ = 413,96 = 4,85%

8528,09 m³ = 100,00%

Calores de formación (ver tablas):

ZnS = - 48500 Kcal/mol

ZnO = - 83170 "

SO₂ = - 70960 "

Reacción de tostación



$$\Delta H_{298}^\circ = 18,48 \times (-70960 - 83170 + 48500) = -1'952.042,4 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor en los productos

$$H_T - H_{298} = aT + bT^2 + cT^{-1} + d \quad (\text{Kcal/mol})$$

Gases

$$\text{N}_2 = 6704,10 \times 28/22,4 = 8380,125 \text{ Kg.} = 299,29 \text{ moles.}$$

$$\text{O}_2 = 1161,14 / 22,4 = 51,84 \text{ moles}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 11,11 \text{ moles}$$

$$\text{SO}_2 = 18,48 \text{ moles.}$$

$$T = 427 + 273 = 700\text{K}$$

Para el N_2 :

$$H_T - H_{298} = 6,66T + 0,51 \times 10^{-3}T^2 - 2031$$

Para el O_2 :

$$H_T - H_{298} = 7,16T + 0,5 \times 10^{-3}T^2 + 0,4 \times 10^5 T^{-1} - 2313$$

Para el H_2O :

$$H_T - H_{298} = 7,17T + 1,28 \times 10^{-3}T^2 - 0,08 \times 10^5 T^{-1} - 2225$$

Para el SO_2 :

$$H_T - H_{298} = 10,38T + 1,27 \times 10^{-3}T^2 + 1,42 \times 10^5 T^{-1} - 3683$$

Contenido de calor en los gases a 700K:

$$\text{N}_2 = (6,66 \times 700 + 0,51 \times 10^{-3} \times 700^2 - 2031) \times 299,29 = 862225 \text{ Kcal.}$$

$$\text{O}_2 = (7,16 \times 700 + 0,5 \times 10^{-3} \times 700^2 + 0,4 \times 10^5 \times 700^{-1} - 2313) \times 51,84 = 155579$$

$$\text{H}_2\text{O} = (7,17 \times 700 + 1,28 \times 10^{-3} \times 700^2 - 0,08 \times 10^5 \times 700^{-1} - 2225) \times 11,11 = 37883$$

$$\text{SO}_2 = (10,38 \times 700 + 1,27 \times 10^{-3} \times 700^2 + 1,42 \times 10^5 \times 700^{-1} - 3683) \times 18,48 = 81463$$

$$\text{Total contenido de calor en los gases} = 1'137.150 \text{ Kcal.}$$

Para el ZnO :

$$H_T - H_{298} = 11,71T + 0,61 \times 10^{-3}T^2 + 2,18 \times 10^5 T^{-1} - 4277$$

Contenido de calor en ZnO a 700°C:

$$H_T - H_{298} = 18,48 \times (11,71 \times 700 + 0,61 \times 10^{-3} \times 700^2 + 2,18 \times 10^5 \times 700^{-1} - 4277) = 83720$$

$$\text{Calor utilizado en evaporación del } \text{H}_2\text{O} = 586 \times 200 = 117200 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Pérdidas de calor} = 1'952.042 - 1'137.150 - 83720 - 117200 = 613972 \text{ Kcal./hr.}$$

$$\text{Pérdida de calor desde el horno a los alrededores} = 613972 \text{ Kcal./hr. (6-1)}$$

EJERCICIO N°7 (9)

El carbonato de calcio se descompone en CaO y CO_2 al calentarlo en un horno giratorio, utilizando como combustible un gas natural consistente en metano (CH_4) puro.

El CO generado de la descomposición del carbonato de calcio, se mezcla con los productos de la combustión para formar los gases efluentes.

El consumo de combustible es de 8000 ft^3/ton (C.N.) de CaO producido

El porcentaje promedio de los gases de la combustión sobre una base de en seco es de

$$75\% \text{N}_2, 4\% \text{O}_2, 21\% \text{CO}_2$$

Las temperaturas son como sigue:

Carbonato de calcio entrante combustible y aire todos sustancialmente a 77°F

El producto de óxido de calcio (CaO), sale a 2200°F.

Los gases de la combustión dejan el horno a 1100°F

PREGUNTAS

1. Realizar un balance térmico del proceso.

SOLUCION

1.

Cálculo de materias.

Base = 1 tonelada (2000 libras) de CaO

Reaccion de descomposicion del CaCO_3



$$\text{CaCO}_3 = 2000 \times 100.56 \div 3571.43 \text{ lbs.} = 35.71 \text{ moles.}$$

$$\text{CO}_2 = 2000 \times 44.56 \div 3571.43 \text{ lbs.} = 12821.43 \text{ ft}^3 = 35.71 \text{ moles.}$$

Reacción de combustión



$$\text{O}_2 = 8000 \times 2 = 16000 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 = 8000 \text{ ft}^3$$

$$\text{CO}_2 \text{ total} = 8000 + 12821.43 = 20821 \text{ ft}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 8000 \times 2 = 16000 \text{ ft}^3$$

$$\text{Gas seco} = 20821/0.21 = 99148 \text{ ft}^3$$

Gas total

$$\text{N}_2 = 99148 \times 0.75 = 74361 \text{ ft}^3 = 64.58\%$$

$$\text{O}_2 = 99148 \times 0.04 = 3966 = 3.44\%$$

$$\text{CO}_2 = 20821 = 18.08\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 16000 = 13.90\%$$

$$\text{Total gas húmedo} = 99148 \text{ ft}^3 = 100.00\%$$

Cálculo de los calores.

$$1 \text{ Kcal.} = 2,205 \text{ lb.-cal.} = 3.97 \text{ BTU}$$

$$\text{Potencia calorífica del CH}_4 = 962 \text{ BTU/ft}^3$$

$$\text{Potencia calorífica total del CH}_4 = 962 \times 8000 = 7'696'000 \text{ BTU}$$

Calores de formación (-):

$$\text{CaO} = 151.9 \times 1800 = 273420 \text{ BTU/mol}$$

$$\text{CO}_2 = 97.2 \times 1800 = 174960 \text{ "}$$

$$\text{CaCO}_3 = 288.45 \times 1800 = 519210 \text{ "}$$

Calor de descomposición del CaCO_3

$$= 35.71 \times (-174960 - 273420 + 519210) = +2'529.340 \text{ BTU.}$$

Contenido de calor en los productos al salir.

Para el CaO a 2200°F.

$$H_{1100} - H_{77} = 26000 \text{ BTU/mol}$$

$$H_{1100} - H_{77} = 26000 \times 35,71 = 928460 \text{ BTU}$$

Para los gases a 1100°F.

$$N_2 = 74361/359 = 207,13 \text{ moles}$$

$$O_2 = 3966/359 = 11,05 \text{ moles.}$$

$$CO_2 = 20821/359 = 58 \text{ moles}$$

$$H_2O = 16000/359 = 44,57 \text{ moles.}$$

$$H_i - H_{77} = \text{BTU/mol.}$$

Las tablas, página 398 de este libro, no traen valores para $H_{1100} - H_{77}$, pero sí los traen para $t = 1000^\circ\text{F}$ y para $t = 1200^\circ\text{F}$. Interpolando entre los valores de estas dos temperaturas, se pudo determinar para $t = 1100^\circ\text{F}$, así.

Para el N_2 :

$$H_{1100} - H_{77} = 7385 \text{ BTU/mol}$$

Para el O_2 :

$$H_{1100} - H_{77} = 7790 \text{ BTU/mol.}$$

Para el CO_2 :

$$H_{1100} - H_{77} = 11350 \text{ BTU/mol}$$

Para el H_2O :

$$H_{1100} - H_{77} = 8875 \text{ BTU/mol}$$

Contenido de calor del gas al salir:

$$N_2 = 207,3 \times 7385 = 1'529.655 \text{ BTU}$$

$$O_2 = 11,05 \times 7790 = 86.080$$

$$CO_2 = 58 \times 11350 = 658.300$$

$$H_2O = 44,57 \times 8875 = 395.559$$

$$\text{Calor en el gas al salir} = 2'669.594 \text{ BTU}$$

BALANCE TERMICO (7-1)

CALOR SUMINISTRADO (BTU)		CALOR DISTRIBUIDO (BTU)	
Potencia calorífica del $CH_4 = 7'696'000$	100,0%	Descomposición $CaCO_3 = 2'529'340$	32,87%
		Calor sacado por el $CaO = 928.460$	12,06%
		Calor sacado por el gas = 2'669.594	34,69%
		Perdidas = 1'568.606	20,38%
		Total = 7'696'000	100,0%

EJERCICIO N°8 (9)

Una tonelada corta de carbon con un poder calorífico de 13500 BTU por libra, rinde como productos principales de la coquización 0,75 toneladas de coque con un poder calorífico de 12000 BTU por libra, 10000 pies cúbicos de gas de carbon con un poder calorífico de 550 BTU por pie cúbico y 75 libras de alquitran, con un poder calorífico de 16000 BTU por libra.

Los valores térmicos de los otros productos pueden pasarse por alto.

El 40% del gas se quema para calentar el horno.

PREGUNTAS

1. Preparar un balance termico para el proceso de coquizacion como un todo y calcular la cantidad total de calor consumido como perdida de calor del horno y los calores sensibles en los productos (coque, gas, productos de combustión, etc.), en BTU por tonelada de carbon.
2. Expresar este consumo de calor como un porcentaje del valor calorifico original del carbon.
3. ¿Que porcentajes del poder calorifico original del carbon, se recuperan finalmente en el coque, alquitran y 6000 ptes cubicos de gas de carbon?

SOLUCION

1.
1 tonelada corta = 2000 libras.

Poder calorifico del carbon = $13500 \text{ (BTU/lb)} \times 2000 \text{ lbs.} = 27'000'000 \text{ BTU}$
 Poder calorifico del coque = $12000 \text{ (BTU/lb)} \times 0,75 \times 2000 \text{ lb} = 18'000'000 \text{ BTU}$
 Poder calorifico del gas = $550 \text{ (BTU/ft}^3) \times 10000 \text{ ft}^3 = 5'500'000 \text{ BTU}$
 Poder calorifico del alquitran = $16000 \text{ (BTU/lb)} \times 75 \text{ lbs} = 1'200'000 \text{ BTU}$
 Poder calorifico del gas formado (calentamiento) = $5'500'000 \times 0,4 = 2'200'000 \text{ BTU}$
 Calor sacado en el gas = $5'500'000 - 2'200'000 = 3'300'000 \text{ BTU}$
 Las pérdidas + los calores sensibles se obtienen por diferencia.

BALANCE TERMICO (8-1)

CALOR DE ENTRADA (BTU)		CALOR DE SALIDA (BTU)	
Poder calorifico del carbon	27'000'000	Poder calorifico del coque	18'000'000
Calentamiento del horno	2'200'000	Poder calorifico del alquitran	1'200'000
		Poder calorifico del gas	= 3'300'000
		Pérdidas de calor + calores sensibles	= 6'700'000
Total	29'200'000	Total	= 29'200'000

2.
 $\text{Pérdidas} + \text{calor sensible} = 6'700'000 / 29'200'000 = 0,2295$
 $\text{Pérdidas} + \text{calores sensibles} = 24,8\% \text{ del original del carbon (8-2)}$

3.
 $\text{Calor recuperado en el coque} = 1'200'000 / 27'000'000 = 0,666$
 $\text{Calor del carbon recuperado en el coque} = 66,6\% \text{ (8-3)}$

$\text{Calor recuperado en el alquitran} = 1,2 / 27 = 0,0444$
 $\text{Calor del carbon recuperado en el alquitran} = 4,44\% \text{ (8-3)}$

$\text{Calor recuperado en el gas} = 550 \times 6000 / 27'000'000 = 0,1222$
 $\text{Calor del carbon recuperado en el gas} = 12,22\% \text{ (8-3)}$

EJERCICIO N°9 (7)

En el horno del ejercicio #13 del Capitulo VII, el soplo es precalentado a 650°C . Los gases salen del horno a 250°C .

El horno utiliza, por tonelada de arrabio, 500 galones de agua para enfriamiento. La agua entra a 10°C y sale a 60°C .

La escoria y el arrabio salen del horno a 1500°C . Calor especifico de la escoria, 0,2. Calor especifico del arrabio, 0,15.

El calor de formacion de la escoria es 360 kilocalorias por kilogramo de SiO₂. Despreciar el calor de solucion del Mn, Si y P en el arrabio.

PREGUNTAS

1 Realizar un balance de calor del horno.

SOLUCION

1

1 galón británico = 1,201 galón U.S.A

1 galón U.S.A = 3,7854 litros; 1 litro = 0,2642 galones U.S.A.

1 m³ = 35,314 ft

Calor aportado.

C → gas = 407 lbs

C → CO = 2100 x 12/28 = 900 lbs.

C → CO₂ = 1407 - 900 = 507 lbs.

Calor generado cuando C → CO = 900 x 2430 = 2'187.000 lb -cal

" " " C → CO₂ = 507 x 8100 = 4'106.700
6'293.700 lb -cal

Precaentamiento del soplo a 650°C:

Soplo = 91000 ft³ x 29/359 = 7351 lbs

Calor sensible = 7351 x (0,234 + 1,7 x 10⁻⁵ x 650) x 650 = 1'170 886 lb -cal.

Precaentamiento del agua a 10°C

H₂O = 500 gal x 3,7854 lbs / gal = 1892,5 lbs = 1892,5 Kg x 1 lb / 0,4536 Kg = 4172,2 lbs

Calor sensible = 4172,2 x (0,463 + 6,2 x 10⁻⁵ x 10) x 10 = 19343 lbs.-cal

Calor de formación de la escoria

SiO₂ = 274,7 x 2000/1176,5 = 467 lbs.

Calor de formación de la escoria = 360 (Kcal / Kg) x 2,2046 (lb -cal / Kcal) x 0,4536 Kg / lb.
= 360 lb-cal / lb

Calor de formación de la escoria = 467 x 360 = 168120 lb-cal

Calores de descomposición:

Fe₂O₃ = 2Fe + 3 O

Fe₂O₃ = 2720 lbs. = 2720/260 = 17 moles.

Calor de descomposición = 17 x 98500 = 3'374.500

Formación del FeO: Fe + O = FeO

Calor de formación del FeO = 64300 x 33,3/72 = 29739

Calor neto de descomposición del Fe₂O₃ = 3'374 500 - 29739 = 3'344 761

MnO = Mn + O

MnO reducido = 51,8 lbs = 51,8/71 = 0,7296 moles.

Calor de descomposición del MnO = 0,7296 x 96500 = 70406 lb-cal

SiO₂ = Si + 2 O

SiO₂ reducido = 28 + 32 = 60 lbs. = 1 mol.

Calor de descomposición del SiO₂ = 1 x 201000 = 201000 lb-cal



$$\text{CaCO}_3 = 670 \text{ lbs.} = 6,7 \text{ moles.}$$

$$\text{Calor de descomposición del CaCO}_3 = 6,7 \times 43500 = 291450$$

Contenido de calor de los productos al salir.

Arrabio a 1500°C

El contenido de calor del arrabio en su punto de fusión (1100°C), se toma como
= 230 lb.-cal/lb.

$$\begin{aligned} \text{Contenido de calor del arrabio a la temperatura de salida (1500°C)} \\ = 2000 \times 230 + 2000 \times 0,15 \times (1500 - 1100) = 580000 \text{ lb.-cal} \end{aligned}$$

Escoria a 1500°C

$$\text{Escoria} = 638,5 \times 2000 / 1176,5 = 1085,4 \text{ lbs.}$$

Si asumimos para la escoria un punto de fusión de 1400°C (7, pag. 398), en este punto tendrá un contenido de calor de 450 lb.-cal/lb.

$$\begin{aligned} \text{Contenido de calor de la escoria a la temperatura de salida (1500°C)} \\ = 1085,4 \times 450 + 1085,4 \times 0,30 \times (1500 - 1400) = 520992 \text{ lb.-cal} \end{aligned}$$

Contenido de calor del agua al salir (60°C)

$$= 4172,2 \times (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \times 60) \times 60 = 116835 \text{ lb.-cal.}$$

Gases a 250°C:

$$\text{CO} = 2100 \times (0,242 + 1,8 \times 10^{-5} \times 250) \times 250 = 129413 \text{ lb.-cal}$$

$$\text{CO}_2 = 2153,8 \times (0,205 + 4,6 \times 10^{-5} \times 250) \times 250 = 116574$$

$$\text{H}_2\text{O} = 136 \times (0,463 + 6,2 \times 10^{-5} \times 250) \times 250 = 16269$$

$$\text{N}_2 = 71890 \times (28/359) \times (0,24 + 1,8 \times 10^{-5} \times 250) \times 250 = 342729$$

$$\text{Contenido de calor de los gases al salir} = 604985 \text{ lb.-cal}$$

$$\text{Calor absorbido por evaporación del H}_2\text{O} = 136 \times 586 = 79696 \text{ lb.-cal}$$

Las pérdidas se obtienen por diferencia entre el calor suministrado y el calor utilizado

Con los calculos anteriores se realiza el balance de calor que aparece a continuación

BALANCE DE CALOR (9-1)

CALOR SUMINISTRADO (lb.-cal)			CALOR DISTRIBUIDO (lb.-cal)		
Combustión del coque	6 293 700	82,25%	Descomposición del Fe ₂ O ₃	3 344 761	43,71%
Pre calentamiento del soplo	1 170 886	15,30%	Descomposición del MnO	70 406	0,92%
Agua al entrar	19 343	0,25%	Descomposición de SiO ₂	201 000	2,63%
Formación de escoria	168 120	2,20%	Descomposición del CaCO ₃	291 450	3,80%
			Calor en el arrabio al salir	580 000	7,58%
			Calor en la escoria al salir	520 992	6,80%
			Calor en los gases al salir	604 985	7,91%
			Calor en el agua al salir	116 835	1,54%
			Para evaporación del agua	79 696	1,04%
			Pérdidas por radiación, etc.	1 841 924	24,06%
Total	7 652 049	100,0%	Total	7 652 049	100,0%

EJERCICIO N°10 (7)

Se asume un alto horno para reducir Fe_2O_3 puro a Fe, y se asume también que todas las reducciones son producidas por CO. Por cada 960 kilogramos de Fe producido se cargan 300 de CaCO_3 y 800 kilogramos de C puro que son quemados en las toberas.

La temperatura del soplo es de 800°C y la de los gases al salir es de 200°C . La escoria contiene 45% CaO. La temperatura de la escoria y del Fe al salir del horno es de 1600°C . El punto de fusión de la escoria y del hierro es de 1500°C .

PREGUNTAS

1. El volumen y composición del gas del alto horno, por tonelada métrica de Fe producido.
2. El volumen de soplo requerido, por tonelada de Fe.
3. El porcentaje de la potencia calorífica total del combustible que es desarrollado en el horno.
4. Un balance de calor del horno, por 1000 kilogramos de Fe reducidos.

SOLUCION

1.

Gas de alto horno = $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$

Fe producido = 1000 Kg.

CaCO_3 cargado = $300 \times 1000/960 = 312,5$ Kg.

C cargado = $800 \times 1000/960 = 833,4$ Kg.

Reacción en las toberas:

$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$: $\text{CO} = 833,4 \times 22,4/12 = 1555,68 \text{ m}^3$

$\text{O}_2 = \text{CO}/2 = 777,84 \text{ m}^3$

$\text{N}_2 = 777,84 \times 79/21 = 2926,16 \text{ m}^3$

Reacción de reducción:

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$

CO consumido = CO_2 producido = $1000 \times (3 \times 22,4/2 \times 56) = 600 \text{ m}^3$

CO_2 del $\text{CaCO}_3 = 312,5 \times 22,4/100 = 70 \text{ m}^3$

Volumen y composición del gas (10-1)

CO = 1555,68 600 = 955,68 $\text{m}^3 = 21,00\%$

$\text{CO}_2 = 600 + 70 = 670,00 = 14,72\%$

$\text{N}_2 = 2926,16 = 64,28\%$

Total gas = 4551,84 $\text{m}^3 = 100,00\%$

2.

Soplo = $777,84/0,21 = 3704 \text{ m}^3$

Soplo requerido = $3704 \text{ m}^3/\text{ton. de Fe. (10-2)}$

3.

Potencia calorífica total del C = $833,4 \times 8100 = 6'750.540 \text{ Kcal.}$

$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 955,68 \times 12/22,4 = 511,97 \text{ Kg.}$

$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 600 \times 12/22,4 = 321,43 \text{ Kg.}$

Calor generado cuando $C \rightarrow CO = 511,97 \times 2430 = 1'244.087 \text{ Kcal.}$

" " " $C \rightarrow CO_2 = 321,43 \times 8100 = 2'603.583 \text{ "}$
Total calor desarrollado $= 3'847.670 \text{ Kcal.}$

Calor desarrollado $= 3'847.670 / 6'750.540 = 0,57$

Calor desarrollado en el horno = 57,0% (10-3)

4.

Precalentamiento del aire a 800°C

$= 3704 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 800) \times 800 = 947039 \text{ Kcal.}$

Calor de descomposición del $Fe_2O_3 = 1000 \times 1777 = 1'777.000 \text{ Kcal}$

Calor de descomposición del $CaCO_3 = 43450 \times 312,5/100 = 135781 \text{ Kcal.}$

Peso de la escoria $= 312,5 \times 0,56/0,45 = 389 \text{ Kg.}$

CaO en escoria $= 389 \times 0,45 = 175 \text{ Kg.}$

Calor de formación de la escoria:

Asumiendo que se forma el compuesto $CaO \cdot SiO_2$, cuya relación de pesos moleculares $56/60 = 0,934$ es bastante cercana a la relación $CaO \cdot SiO_2$ de la escoria $= 175 (389-175) = 0,818$, y asumiendo que el resto de la escoria es SiO_2 y que la relación puede acercarse más si existe otro compuesto en poca proporción, de la Tabla XLIV (B) del Apéndice, podemos tomar el calor de formación como $= 25200/56 = 450 \text{ Kg./Kg. de CaO.}$

Calor de formación de la escoria $= 450 \times 175 = 78750 \text{ Kcal.}$

Vamos a asumir, a falta de más datos (pag. 398 del libro), que el contenido de calor de la escoria en su punto de fusión es de 450 Kcal/Kg y que su calor específico en estado líquido $= 0,25$

Contenido de calor de la escoria a 1600°C

$= 389 \times 450 + 389 \times 0,25 \times (1600 - 1500) = 184775 \text{ Kcal.}$

Contenido de calor del Fe a $1600^\circ\text{C} = 334 \times 1000 + 1000 \times 0,21 \times 100 = 355000 \text{ Kcal.}$

Contenido de calor en los gases a 200°C :

$CO + N_2 = 3881,84 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 200) \times 200 = 237879 \text{ Kcal}$

$CO_2 = 670 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 200) \times 200 = 56816$
294695 Kcal.

BALANCE DE CALOR (10-4)

CALOR SUMINISTRADO (Kcal)	(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal)	(%)
Combustión del C $3'847.670$	78,95	Descomposición de $CaCO_3 = 135.781$	2,79
Precalentamiento del aire 947.039	19,43	Descomposición de $Fe_2O_3 = 1'777.000$	36,46
Formación de escoria $= 78.750$	1,62	Calor en escoria $= 184.775$	3,79
	100,00	Calor en Fe $= 355.000$	7,28
		Calor en gas $= 294.695$	6,15
		Perdidas por radiación, etc. $= 2'126.208$	43,63
Total $= 4'873.459$		Total $= 4'873.459$	100,00

EJERCICIO N°11 (7)

En el horno de ejercicio N° 9 Cap. VII, los gases salen del horno a 350°C , mientras que el aire precalentado a 700°C . La escoria cuando sale del horno contiene 500 kilocalorías por kilogramo de arrabio. 3000 Kcal/Kg . El calor perdido en el agua de enfriamiento alrededor de las paredes del horno es de 100 Kcal/Kg de arrabio producido. El calor de formación de la escoria es de 280 Kcal/Kg de escoria.

PREGUNTAS

Calcular el balance de calor del horno, por 1000 kilogramos de mineral tratado.

SOLUCION

Calor derivado de la combustión del coque:

Se necesita que traslade la escala de 1'400'000 Kg. de mineral hasta 1000 Kg. de este

$$\text{C del coque} \rightarrow \text{gas} = 831660 \times 1000/1'400'000 = 594,04 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO} = 1'458'537 \times (1000/1'400'000) = 1041,81 \text{ Kg.}$$

$$\text{C de este} = 1041,81 \times 12/28 = 446,49 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO}_2 \text{ de combustion} = 757433 \times (1000/1'400'000) = 541,02 \text{ Kg.}$$

$$\text{C de este} = 541,02 \times 12/44 = 147,55 \text{ Kg.}$$

$$\text{Calor generado cuando } \text{C} \rightarrow \text{CO} = 446,49 \times 2430 = 1'084.971 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor generado cuando } \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 147,55 \times 8100 = 1'195.155 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor generado por combustión} = 2'280.126 \text{ Kcal.}$$

Precalentamiento del aire a 700°C

$$\text{Arrabio} = 856 \times (1000/1'400'000) = 0,6114 \text{ ton.}$$

$$\text{Aire} = 4000 \times 0,6114 = 2445,7 \text{ m}^3$$

Calor por precalentamiento del aire

$$2445,7 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 700) \times 700 = 543386 \text{ Kcal.}$$

Calor de formación de la escoria

$$\text{Escoria} = 378000 \times (1/1400) = 270 \text{ Kg.}$$

$$\text{Calor de formación de la escoria} = 270 \times 280 = 75600 \text{ Kcal.}$$

Calores de reducción de óxidos

$$\text{Fe reducido del } \text{Fe}_2\text{O}_3 = 1000 \times 0,68 \times 168/232 = 492,4 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe reducido del } \text{Fe}_3\text{O}_4 = 1000 \times 0,08 \times 112/160 = 56,0 \text{ Kg.}$$

$$\text{P reducido del } \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 = 1000 \times 0,03 \times 62/310 = 6 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO} = 11,61 \text{ Kg.; CaO} = 11,61 \times 56/40 = 16,26 \text{ Kg.}$$

$$\text{Mn reducido del MnO} = 1000 \times 0,05 \times 0,4 \times 55/71 = 15,49 \text{ Kg.}$$

$$\text{Coke} = 1000 \times 0,7 = 700 \text{ Kg.}$$

$$\text{Si reducido} = 0,22 \times (1000 \times 0,12 + 700 \times 0,08) \times 28/60 = 18,1 \text{ Kg.}$$

Calores de reducción de óxidos:

$$\begin{aligned}
 \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe} &= 492,4 \times 1588 = 781.931,2 \text{ Kcal.} \\
 \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe} &= 56 \times 1777 = 99.512,0 \\
 \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \rightarrow \text{P} &= 11,61 \times 8170 = 94.853,7 \\
 \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Si} &= 18,1 \times 7160 = 129.596,0 \\
 \text{MnO} \rightarrow \text{Mn} &= 15,49 \times 1757 = 27.215,9 \\
 &= 1.133.109,0 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Descomposición del CaCO_3 .

$$\begin{aligned}
 \text{CaCO}_3 &= 244 \times 1000 \times (1/1400) = 174,29 \text{ Kg.} = 1,743 \text{ moles.} \\
 \text{Calor de descomposición del CaCO}_3 &= 1,743 \times 43450 = 75733 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Evaporación del agua.

$$\begin{aligned}
 \text{H}_2\text{O} &= 1000 \times 0,04 + 700 \times 0,04 = 68 \text{ Kg} \\
 \text{Calor por evaporación del agua} &= 68 \times 586 = 39848 \text{ Kcal.}
 \end{aligned}$$

Calor sensible en el gas al salir a 350°C

$$\begin{aligned}
 \text{N}_2 &= 4000 \times 0,6114 \times 0,79 = 1932 \text{ m}^3 \\
 \text{H}_2\text{O} &= 118471 \times 1/1400 = 84,62 \text{ m}^3 \\
 \text{CO} &= 1116.830 \times 1/1400 = 797,74 \text{ m}^3 \\
 \text{CO}_2 &= 440177 \times 1/1400 = 314,41 \text{ m}^3 \\
 \text{CO} + \text{N}_2 &= 2719,74 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 350) \times 350 = 295890 \text{ Kcal.} \\
 \text{H}_2\text{O} &= 84,62 \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 350) \times 350 = 11565 \\
 \text{CO}_2 &= 314,41 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 350) \times 350 = 48144 \\
 \text{Contenido de calor en el gas al salir} &= 355599 \text{ Kcal.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Calor sensible en arrabio} = 0,6114 \times 1000 \times 315 = 192591 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor sensible en la escoria} = 270 \times 500 = 135000 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor perdido en el agua de enfriamiento} = 0,6114 \times 1000 \times 200 = 122280 \text{ Kcal}$$

Calor de formación del arrabio.

$$\text{C en arrabio} = 0,6114 \times 1000 \times 0,036 = 22 \text{ Kg.}$$

$$\text{Si en arrabio} = 0,6114 \times 1000 \times 0,03 = 18 \text{ Kg}$$

BALANCE DE CALOR (11-1)

CALOR SUMINISTRADO (Kcal)	(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal)	(%)
Combustión del coque = 2'280.126	78,65	Formación de arrabio = 22.383	0,77
Pre calentamiento de aire = 543.386	18,74	Reducción de óxidos = 1'133.109	32,98
Formación de escoria = 75.000	2,61	Descomposición CaCO_3 = 75.733	2,1
Total = 2'899.112	100,00	Evaporación H_2O = 39.848	1,18
		Gas al salir = 355.599	12,27
		Sensible en arrabio = 192.591	6,64
		Sensible en escoria = 135.000	4,66
		Agua de enfriamiento = 122.280	4,22
		Pérdidas por radiación, etc. = 8.2586	28,37
		Total = 2'899.112	100,00

Si asumimos la formación de Fe-C y Fe-Si , pero despreciamos la influencia de Mn y P por estar en cantidades muy pequeñas, tendríamos:



EJERCICIO N°12 (7)

Un mineral de magnetita es fundido en un horno eléctrico para arrabio. El análisis del mineral fue el siguiente:

Fe_3O_4	78,0%	MgO	5,4%
SiO_2	7,0	S	0,6
Al_2O_3	2,0	CO_2	2,0
CaO	3,0	H_2O	2,0

Se utiliza como agente reductor carbon de leña (asumir C puro) conteniendo 6% H_2O y la cantidad fue de un cuarto del peso del Fe reducido. Se utiliza como fundente SiO_2 puro para producir una escoria con 33% SiO_2 . El arrabio producido contiene 4% C, 3,5% Si y el balance es Fe. La escoria y el arrabio al colarlos contienen 570 y 330 kilocalorías por kilogramo, respectivamente.

Assumir que todo el hierro es reducido a Fe y que todo el azufre pasa a la escoria como FeS . El calor de combinación de los óxidos para formar la escoria es de 150 kilocalorías por kilogramo de SiO_2 , Al_2O_3 . Un tercio del calor suministrado al horno procede de la oxidación del C y la formación de la escoria y dos tercios procede de la corriente eléctrica.

Despreciar la oxidación de los electrodos.

Los gases salen del horno a 300°C.

PREGUNTAS

1. El peso del mineral, fundente y carbon de madera necesarios, por tonelada métrica de arrabio producido.

2. La composición del gas que sale del horno, despreciando cualquier infiltración de aire.

3. Los kilovatio-hora de electricidad requeridos, por tonelada de arrabio producido.

4. El porcentaje del calor total en el horno que está representado por el contenido de calor en el arrabio, la escoria y el gas, y por la potencia calorífica del gas.

SOLUCION

$$1. \text{ Arrabio} = 1000 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe en mineral} = \text{Fe en arrabio.}$$

$$\text{Fe en arrabio} = 100 - 4 - 3,5 = 92,5\%$$

$$\text{Fe en arrabio} = 1000 \times 0,925 = 925 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 = 925 \times 232/168 = 1277,4 \text{ Kg.}$$

$$\text{Mineral} = 1277,4/0,78 = 1637,7 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del mineral} = 1637,7 \text{ Kg. (12-1)}$$

$$\text{Peso del carbón de leña} = 925 \times 1/4 = 231,25 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso del carbón de leña} = 231,25 \text{ Kg. (12-1)}$$

$$\text{Si en arrabio} = 1000 \times 0,035 = 35 \text{ Kg}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ reducido} = 35 \times 60/28 = 75 \text{ Kg.}$$

Sea. X = fundente, Y = escoria.

$$\text{SiO}_2 \text{ en escoria} = X + 1637,7 \times 0,07 - 75 = X + 39,639 = 0,33Y$$

$$\text{Escoria sin SiO}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{CaS} + \text{MgO} = 0,67Y$$

$$\text{S en mineral} = 1637,7 \times 0,006 = 9,8262 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaS en escoria} = 9,8262 \times 72/32 = 22,11 \text{ Kg.}$$

$$\text{Ca de este} = 22,11 - 9,83 = 12,28 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO de este} = 12,28 \times 56/40 = 17,19 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO cargado} = 1637,7 \times 0,03 = 49,13 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO en escoria} = 49,13 - 17,19 = 31,94 \text{ Kg.}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ en escoria} = 1637,7 \times 0,02 = 32,75 \text{ Kg.}$$

$$\text{MgO en escoria} = 1637,7 \times 0,054 = 88,44 \text{ Kg.}$$

$$\text{Escoria sin CaO} = 22,11 + 31,94 + 32,75 + 88,44 = 175,24 \text{ Kg.}$$

$$175,24 = 0,67Y$$

$$Y = \text{escoria} = 175,24/0,67 = 261,55 \text{ Kg.}$$

$$X = \text{fundente} = \text{SiO}_2 = 0,33 \times 261,55 - 39,64 = 46,67 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso del fundente} = 46,67 \text{ Kg. (12-1)}$$

2

$$\text{C del carbón de leña} = 231,25 \times 0,94 = 217,375 \text{ Kg.}$$

Reacciones de reducción:



$$\text{C} = 75 \times 24/60 = 30 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO} = 75 \times 2 \times 22,4 / 60 = 56 \text{ m}^3$$



$$\text{C} = 22,11 \times 12/72 = 3,685 \text{ Kg.}$$

$$\text{CO} = 22,11 \times 22,4/72 = 6,88 \text{ m}^3$$



$$\text{CO} = 1277,4 \times 4 \times 22,4/232 = 493,46 \text{ m}^3$$

$$\text{CO total} = 56 + 6,88 + 493,46 = 556,34 \text{ m}^3$$

Pero en realidad, no todo el Fe_3O_4 puede ser reducido por el C ya que se necesitaría un exceso de C

$$\text{C para Fe}_3\text{O}_4 = 217,375 - 40 - 30 - 3,685 = 143,69 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ reducido por este} = 143,69 \times 232 / 4 \times 12 = 694,50 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ restante} = 1277,4 - 694,50 = 582,90 \text{ Kg.}$$

Este es reducido por CO:



$$\text{CO} = \text{CO}_2 = 582,9 \times 4 \times 22,4/232 = 225,12 \text{ m}^3$$

Este CO que se consumió en esta reacción debe restarse a total calculado anteriormente as

Composición del gas (12-2)

$$\begin{aligned}
 \text{CO} &= 225,12 &= 331,22 \text{ m}^3 = 52,49\% \\
 \text{CO}_2 &= 12 + (1637,7 \times 0,02) \times 22,4/44 &= 241,79 \text{ m}^3 = 38,32\% \\
 \text{H}_2\text{O} &= (1637,7 \times 0,02 + 231,25 \times 0,06) \times 22,4/18 &= 58,03 \text{ m}^3 = 9,19\% \\
 \text{Gas} &&= 631,04 \text{ m}^3 = 100,00\%
 \end{aligned}$$

Oxidación del C:

$$\begin{aligned}
 \text{C} \rightarrow \text{CO} &= 331,22 \times 12/22,4 = 177,44 \text{ Kg.} \\
 \text{C total} - \text{C en arrabio} &= 217,375 - 40 = 177,375 \text{ Kg.} \\
 \text{Calor del C} \rightarrow \text{CO} &= 177,44 \times 2430 = 431179,2 \text{ Kcal.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 = 32,75 + 261,55 \times 0,33 = 119,0615 \text{ Kg.}$$

$$\text{Calor de formación de escoria} = 119,0615 \times 150 = 17859,225 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor corriente eléctrica} = (431179,2 + 17859,3) \times \frac{2}{3} = 898077 \text{ Kcal}$$

$$1 \text{ Kw-hr} = 860 \text{ Kcal}$$

$$\text{Kw-hr} = 898077/860 = 1044,3$$

$$\text{Kw-hr requeridos} = 1044,3 \text{ (12-3)}$$

Si interpretamos tomando en cuenta que el CO reacciona a CO_2 y le adicionamos este calor tendríamos



$$\text{Calor de esta reacción} = 225,12 \times 3034 = 683014,1 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor corriente eléctrica} = (431179,2 + 17859,2 + 683014,1) \times 2 = 2'264.105 \text{ Kcal}$$

$$\text{Kw-hr} = 2'264.105/860 = 2633$$

$$\text{Kw-hr requeridos} = 2633 \text{ (12-3)}$$

4

$$\text{Calor total en el horno} = 2'264.105 \times 3/2 = 3'396.157,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Contenido de calor en el arrabio} = 1000 \times 330 = 330000 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor en el arrabio} = 330000/3'396.157,5 = 0,0972$$

$$\text{Porcentaje del total} = 9,72 \text{ (12-4)}$$

$$\text{Contenido de calor en la escoria} = 570 \times 261,55 = 149083,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor en la escoria} = 149083,5/3'396.157,5 = 0,0439$$

$$\text{Porcentaje del total} = 4,39 \text{ (12-4)}$$

Contenido de calor en el gas a 300°C:

$$\text{CO} = 331,22 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 30664,3 \text{ Kcal.}$$

$$\text{CO}_2 = 241,79 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 31408,5$$

$$\text{H}_2\text{O} = 58,03 \times (0,373 + 5,0 \times 10^{-5} \times 300) \times 300 = 6754,7$$

$$\text{Total contenido de calor en el gas} = 68827,5 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor en el gas} = 68827,5/3'396.157,5 = 0,0203$$

$$\text{Porcentaje del total} = 2,03 \text{ (12-4)}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 331,22 \times 3034 = 1'004.921,5 \text{ Kcal}$$

$$\text{Potencia calorífica del gas} = 1'004.921,5 / 3'396.157,5 = 0,2959$$

$$\text{Porcentaje del total} = 29,59 \text{ (12-4)}$$

EJERCICIO N°13 (7)

Un convertidor Bessemer ácido sopla 30 toneladas métricas de arrabio a metal puro en 24 minutos. Se producen 2300 kilogramos de escoria, incluidos 100 kilogramos de SiO_2 corroidos del recubrimiento. La escoria analiza 38% SiO_2 , 2% MnO y 50% FeO . Los gases constan de 750 m³ de CO y 1500 m³ de CO_2 balanceados con N_2 . El Fe es oxidado a una rata uniforme.

La presión del soplo es de 1200 mm. manométrica. El soplo entra a 100°C y los gases salen a 1600°C. La temperatura del arrabio cuando se carga es de 1300°C. A final del soplado, la temperatura de la escoria y el metal es de 1650°C.

PREGUNTAS

1. El volumen de aire utilizado a condiciones normales.
2. El tiempo de cada período.
3. La composición del arrabio.
4. La energía requerida por las máquinas de soplado al 80% de eficiencia.
5. Un balance de calor del convertidor (asumir que el calor de formación de la escoria es de 320 kilocalorías por kilogramo de SiO_2).

SOLUCION

1.

Cálculo del oxígeno.

En la escoria:

$$\text{SiO}_2 = 2300 \times 0,38 = 874 \text{ Kg.}$$

$$\text{SiO}_2 \text{ formado del arrabio} = 874 - 100 = 774 \text{ Kg}$$

$$\text{MnO} = 2300 \times 0,12 = 276 \text{ Kg.}$$

$$\text{FeO} = 2300 \times 0,5 = 1150 \text{ Kg}$$

$\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$	$\text{O}_2 = 774 \times 22,4/60$	$= 288,96 \text{ m}^3$
$\text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MnO}$	$\text{O}_2 = 276 \times 11,2/71$	$= 43,54 \text{ m}^3$
$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO}$	$\text{O}_2 = 1150 \times 11,2/72$	$= 178,89 \text{ m}^3$
$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO}$	$\text{O}_2 = 1500 \times 0,5$	$= 750,00 \text{ m}^3$
$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	$\text{O}_2 = 750 \times 1$	$= 750,00 \text{ m}^3$
Total O_2		$= 2011,39 \text{ m}^3$

$$\text{Aire} = 2011,39/0,21 = 9578 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire a C.N} = 9578 \text{ m}^3 \text{ (13-1)}$$

2.

$$\text{Rata de } \text{O}_2 = 2011,39/24 = 83,808 \text{ m}^3/\text{min.}$$

En el 1° período hay oxidación de Si + Mn + algo de Fe.

En el 2° período hay oxidación de C + algo de Fe

$$t_1 \text{ sin Fe} = (288,96 + 43,54) / 83,808 = 3,97 \text{ min}$$

$$t_2 \text{ sin Fe} = 750 \times 2/83,808 = 17,90 \text{ min}$$

$$2,87 \text{ min}$$

$$t \text{ del Fe} = 178,89/83,808 = 2,13 \text{ min}$$

$$\text{en Fe} = 3,97 - 2,13 \times (3,97 - 21,87) = 4,36 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de duración del 1º periodo} = 4,36 \text{ min. (13-2)}$$

$$7,90 + 2,13 \times (17,90 - 21,87) = 19,64 \text{ min.}$$

$$\text{Tiempo de duración del 2º periodo} = 19,64 \text{ min. (13-2)}$$

$$\text{Fe} = \text{Mn} = \text{Fe}$$

$$774 \times 28,60 = 361,2 \text{ Kg.}$$

$$276 \times 55/71 = 213,8 \text{ Kg.}$$

$$500 \times 12,22,4 = 803,6 \text{ Kg}$$

$$\text{del } \text{CO}_2 = 750 \times 12,22,4 = 401,8 \text{ Kg}$$

$$\text{del C del arrabio} = 1205,4 \text{ Kg}$$

$$\text{Fe del arrabio} = 30000 - 361,2 - 213,8 - 1205,4 = 28219,6 \text{ Kg.}$$

Composición del arrabio: (13-3)

$$\text{Si} = 361,2 \text{ Kg.} = 1,20\%$$

$$\text{Mn} = 213,8 = 0,71\%$$

$$\text{C} = 1205,4 = 4,02\%$$

$$\text{Fe} = 28219,6 = 94,07\%$$

$$\frac{30000}{30000} = 100,00\%$$

hacemos la fórmula adiabática (ver detalles, Cap. IX)

$$45 \times V_0 P_0 [(P/P_0)^{0,29} - 1]$$

$$\text{Volumen de aire comprimido, unidad de tiempo} = (9578,74) \times 1,60 = 6,651 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$\text{atm} = 10333 \text{ Kg./m}^2$$

$$\text{atm} = 1200/760 = 2,579 \text{ atm.} =$$

$$45 \times 6,651 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \times 1 \text{ atm.} \times \frac{10333 \text{ Kg}}{1 \text{ atm} \cdot \text{m}^2} [(2,579)^{0,29} - 1]$$

$$= 74910,5 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{seg}}$$

$$= 74910,5 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{seg}} \times \frac{1 \text{ Kw}}{102 \text{ Kg} \cdot \text{m} / \text{seg}} \times \frac{1}{0,8} = 919 \text{ Kw}$$

$$\text{Energía requerida por las máquinas de soplado} = 919 \text{ Kw. (13-4)}$$

Calor sensible en el soplo al entrar a 100°C

$$2,28 \times 10^{-5} + 2,2 \times 10^{-5} \times 100 \times 100 = 291363 \text{ Kcal}$$

Calor de calor del arrabio al entrar a 1300°C, suponiendo que funde a 1100°C

$$30000 \times 30 = 30000 \times 0,15 \times (1300 - 1100) = 77800,000 \text{ Kcal.}$$

Calor de formación de la escoria

$$300 \times 874 = 279680 \text{ Kcal}$$

Calores de oxidación

$$\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 \text{ calor de oxidación} = 201000 \times (774/60) = 2592900 \text{ Kcal}$$

$$\text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MnO: calor de oxidación} = 96500 \times (276/71) = 375127 \text{ Kcal}$$

$$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO: calor de oxidación} = 64300 \times (1150/72) = 1'027'014 \text{ Kcal}$$

$$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO: calor de oxidación} = 803,6 \times 2430 = 1'952.748 \text{ Kcal.}$$

$$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2: \text{calor de oxidación} = 401,8 \times 8100 = 3'254.580 \text{ Kcal.}$$

Contenido de calor de los gases al salir a 1600°C:

$$\text{N}_2 = 9578 \times 0,79 = 7566,62 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 + \text{CO} = 9066,62 \times (0,307 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1600) \times 1600 = 4'891'623 \text{ Kcal}$$

$$\text{CO}_2 = 750 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1600) \times 1600 = 660'000$$

$$\text{Total calor en gases} = 5'551'623 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en el acero al salir a 1650°C:

$$\text{Fe en acero} = 28219,6 - 1150 \times 56/72 = 27325,2 \text{ Kg}$$

$$\text{Contenido de calor} = 27325,2 \times 334 + 27325,2 \times 0,21 \times (1650 - 1534) = 9'792'259 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor de la escoria al salir a 1650°C

Asumiendo una temperatura de fusión de 1100°C el contenido de calor será 300 Kcal/Kg, con un calor específico de 0,25

$$\text{Contenido de calor} = 2300 \times 300 + 2300 \times 0,25 \times (1650 - 1100) = 1'006'250 \text{ Kcal}$$

BALANCE DE CALOR (13-5)

CALOR DISPONIBLE (Kcal)		(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal)		(%)
Calor sensible en el soplo =	291'363	1,66	Calor en el gas =	5'551'623	3,59
Calor sensible en arrabio =	7'800'000	44,39	Calor en el acero =	9'792'259	55,72
Formación de escoria =	279'680	1,59	Calor en la escoria =	1'006'250	5,73
Oxidación del Si =	2'592'900	14,75	Perdidas por radiación, etc =	1'223'280	6,96
Oxidación del Mn =	375'127	2,13	Total =	17'573'412	100,00
Oxidación del Fe =	1'027'014	5,85			
C → CO =	1'952'748	11,11			
C → CO ₂ =	3'254'580	18,52			
Total =	17'573'412	100,00			

EJERCICIO N°14 (7)

Un convertidor Bessemer básico procesa 20000 kilogramos de un arrabio que contiene 4,0% C, 1,0% Si, 1,0% Mn, 2,2% P y 91,8% Fe. Este es soplado hasta Fe puro, perdiendo 6% del Fe durante el soplado, el cual es oxidado a una rata uniforme. Asumir tres periodos diferentes, durante el hervido, un tercio del carbono reacciona a CO₂ y dos tercios a CO.

La escoria no contendrá por encima del 12% SiO₂ y se adiciona CaO para diluirse en este porcentaje.

El aire es soplado a una rata de 400 m³/min. Los gases salen del convertidor a una temperatura promedio de 1500°C. El aire está frío. El CaO es precalentado a 800°C.

$$\text{Calor en 1 kilogramo de arrabio al entrar} = 255 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor en 1 kilogramo del baño soplado} = 375$$

$$\text{Calor en 1 kilogramo de escoria} = 450$$

$$\text{Calor de formación de la escoria, por kilogramo} = 200$$

PREGUNTAS

La duración de cada periodo del sopiado

2 El peso del CaO a ser adicionado.

El calor generado en el convertidor por la oxidación del baño y la formación de la escoria.

4 El calor sacado del convertidor por los gases calientes.

- balance de calor del convertidor.

SOLUCION

Rata de entrada del $O_2 = 400 \times 0,21 = 84 \text{ m}^3/\text{min}$

Oxidaciones durante el 1º periodo

$$Si \rightarrow SiO_2 \quad O_2 = 20000 \times 0,01 \times 22,4/28 = 160,00 \text{ m}^3$$

$$Mn \rightarrow MnO \quad O_2 = 20000 \times 0,01 \times 11,2/55 = 40,73 \text{ m}^3$$

$$O_2 \text{ del 1º periodo sin el del Fe} = 200,73 \text{ m}^3$$

Oxidaciones durante el 2º periodo

$$C = 20000 \times 0,04 = 800 \text{ Kg}$$

$$C \rightarrow CO = 800 \times 2/3 = 533,33 \text{ Kg}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 800 \times 1/3 = 266,67 \text{ Kg}$$

$$\frac{1}{2} O_2 = CO: O_2 = 533,33 \times 11,2/12 = 497,77 \text{ m}^3$$

$$O_2 = CO_2: O_2 = 266,67 \times 22,4/12 = 497,78$$

$$O_2 \text{ del 2º periodo sin el del Fe} = 955,55 \text{ m}^3$$

Oxidaciones durante el 3º periodo

$$2P \rightarrow P_2O_5 \quad O_2 \text{ sin el del Fe} = 20000 \times 0,022 \times (2,5 \times 22,4/62) = 397,42 \text{ m}^3$$

Oxidación del Fe

$$\text{Fe oxidado} = 20000 \times 0,918 \times 0,05 = 918 \text{ Kg}$$

$$\frac{1}{2} O_2 = FeO: O_2 = 918 \times 11,2/56 = 183,6 \text{ m}^3$$

Cálculo de los tiempos.

$$t_1 \text{ sin oxidación de Fe} = 200,73/84 = 2,39 \text{ min.}$$

$$t_2 \text{ sin oxidación de Fe} = 955,55/84 = 11,38 \text{ min.}$$

$$t_3 \text{ sin oxidación de Fe} = 397,42/84 = 4,73 \text{ min.}$$

$$18,50 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de oxidación de Fe} = 183,6/84 = 2,19 \text{ min.}$$

$$t_1 \text{ total} = 2,39 + 2,19 \times (2,39/18,5) = 2,67 \text{ min.}$$

$$\text{Duración del 1º periodo} = 2,67 \text{ min. (14-1)}$$

$$t_2 \text{ total} = 11,38 + 2,19 \times (11,38/18,5) = 12,73 \text{ min}$$

$$\text{Duración del 2º periodo} = 12,73 \text{ min. (14-1)}$$

$$t_3 \text{ total} = 4,73 + 2,19 \times (4,73/18,5) = 5,29 \text{ min}$$

$$\text{Duración del 3º periodo} = 5,29 \text{ min. (14-1)}$$

2

Calculo de la escoria:

$$\begin{aligned}
 \text{SiO}_2 &= 20000 \times 0,01 \times 60/28 = 428,57 \text{ Kg.} \\
 \text{MnO} &= 20000 \times 0,01 \times 71/55 = 258,18 \\
 \text{P}_2\text{O}_5 &= 20000 \times 0,022 \times 142/62 = 1007,74 \\
 \text{FeO} &= 918 \times 72/56 = 1180,29 \\
 \text{Escoria sin CaO} &= 2874,78 \text{ Kg.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Escoria total} = 428,57/0,12 = 3571,42 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO} = 3571,42 - 2874,78 = 696,46$$

$$\text{CaO adicionado} = 696,46 \text{ Kg. (14-2)}$$

3.

Calores generados por las oxidaciones

$$\begin{aligned}
 \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2: \text{ calor generado} &= 201000 \times (423,57/60) = 1'435.710 \text{ Kcal.} \\
 \text{Mn} \rightarrow \text{MnO}: \text{ calor generado} &= 96500 \times (258,18/71) = 350.907 \\
 \text{P} \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5: \text{ calor generado} &= 366900 \times (1007,74/142) = 2'603.796 \\
 \text{Fe} \rightarrow \text{FeO}: \text{ calor generado} &= 64300 \times (1180,29/72) = 1'054.065 \\
 &= 5'444.478 \text{ Kcal.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{C} \rightarrow \text{CO}: \text{ calor generado} &= 533,33 \times 2430 = 1'295.992 \text{ Kcal.} \\
 \text{C} \rightarrow \text{CO}_2: \text{ calor generado} &= 266,76 \times 8100 = 2'160.027 \\
 &= 3'456.019
 \end{aligned}$$

$$\text{Calor de formación de escoria} = 3571,42 \times 200 = 714.284 \text{ Kcal}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Calor de oxidación + formación de escoria} &= 5'444.478 + 3'456.019 + 714.284 \\
 &= 9'614.781 \text{ Kcal.}
 \end{aligned}$$

$$\text{Calor de oxidación + formación de escoria} = 9'614.781 \text{ Kcal (14-3)}$$

4.

$$\text{O}_2 \text{ total} = 200,73 + 955,55 + 397,42 + 183,6 = 1737,3 \text{ m}^3$$

Gas:

$$\begin{aligned}
 \text{N}_2 &= 1737,3 \times 79/21 = 6535,56 \text{ m}^3 \\
 \text{CO} &= 497,77 \times 2 = 995,54 \\
 &= 7531,10 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{CO}_2 = 497,78 \text{ m}^3$$

Contenido de calor en el gas a 1500°C:

$$\begin{aligned}
 \text{N}_2 + \text{CO} &= 7531,1 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 3'784.378 \text{ Kcal} \\
 \text{CO}_2 &= 497,78 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1500) \times 1500 = 403.919 \\
 &= 4'188.327 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

$$\text{Calor sacado por los gases calientes} = 4'188.327 \text{ Kcal. (14-4)}$$

5

$$\text{Contenido de calor en el arrabio al entrar} = 20000 \times 25,5 = 5'100.000 \text{ Kcal}$$

Cálculo del precalentamiento del CaO a 800°C (1073K):

$$\begin{aligned}
 \text{Calor a 273K} &= 696,64 \times (0,1784 + 4,3 \times 10^{-5} \times 273 + 1926 \times 273^{-1} \times 273) = 41080 \text{ Kcal} \\
 \text{A 1073K} &= 696,64 \times (0,1784 + 4,3 \times 10^{-5} \times 1073 + 1926 \times 1073^{-1} \times 1073) = 68914 \\
 \text{Calor neto de CaO a 1073K} &= 168934 - 41080 = 127854 \text{ Kcal}
 \end{aligned}$$

Contenido de calor en la escoria = $450 \times 3571,42 = 1'607.139 \text{ Kcal.}$

Acero = $20000 \times 0,918 \times 0,95 = 17442 \text{ Kg.}$

Contenido de calor en el acero = $17442 \times 375 = 6'540.750 \text{ Kcal}$

BALANCE DE CALOR (14-5)

CAJAL DISPONIBLE (Kcal)	(%)	CAJAL DISTRIBUIDO (Kcal)	(%)
Calor de N = 435 70	9,67	Gases al salir = 4'188 327	28,22
Calor de Mn = 350 907	2,36	Escoria al salir = 1'607 139	10,85
Calor de P = 2 603 796	17,54	Acero al salir = 6'540 750	44,06
Calor de Fe = 1 054 065	7,10	Perdidas por radiacion etc = 2'506 419	16,89
Calor de C = 1'295 092	8,73	Total = 14 842 635	100,00
C \rightarrow CO ₂ = 2'160,027	14,55		
Formacion de escoria = 714,284	4,81		
Precalentamiento de CaO = 127 854	0,87		
Arrabio al entrar = 5'100 000	34,37		
Total = 14'842,635	100,00		

EJERCICIO N°15 (7)

El siguiente arrabio fue sopado en un convertidor Bessemer ácido que fue cargado con 20 toneladas métricas.

C 4,0%
Mn 0,5
Si 1,4
Fe 94,1

El soplo oxida todas las impurezas y 2% del Fe. Asumir que la oxidacion del Fe ocurre uniformemente a lo largo del sopado. Tres cuartos del carbono pasan a CO y el resto a CO₂.

El aire entra a 40°C y los gases salen del horno a una temperatura promedio de 1420°C en el primer periodo y a 1530°C durante el segundo periodo. El aire es suministrado a una rata de 550 metros cúbicos por minuto.

El arrabio se encuentra a 1250°C cuando es cargado, y el baño (incluyendo la escoria) se encuentra a 1600°C al final del soplado.

PREGUNTAS

1. El volumen total de aire utilizado.
2. El tiempo de cada periodo de soplado.
3. la composición de los gases en cada periodo.
4. La composición de la escoria.
5. El balance de calor de la operación.
6. la rata aproximada de cambio de temperatura del baño para cada periodo, asumiendo que la mitad del calor total absorbido por el convertidor es absorbido en cada periodo y que la capacidad calorifica total del baño es la misma que la del Fe fundido.

SOLUCION

1
Oxidacion de impurezas.

1° periodo sin Fe:

$$\begin{aligned} \text{Si} + \text{O}_2 &= \text{SiO}_2: \quad \text{O}_2 = 20 \times 1000 \times 0,014 \times 22,4/28 &= 224,00 \text{ m}^3 \\ \text{Mn} + \frac{1}{2} \text{O}_2 &= \text{MnO}: \quad \text{O}_2 = 20 \times 1000 \times 0,005 \times 11,2/55 &= 20,36 \\ & &= 244,36 \end{aligned}$$

2º periodo sin Fe:

$$C \text{ en arrabio} = 20000 \times 0,04 = 800 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO \quad 800 \times \frac{3}{4} = 600 \text{ Kg.}$$

$$C \rightarrow CO_2 = 800 \times \frac{1}{4} = 200 \text{ Kg.}$$

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO: O_2 = 600 \times \frac{11,2}{12} = 560,00 \text{ m}^3$$

$$C + O_2 = CO_2: O_2 = 200 \times \frac{22,4}{12} = \frac{373,33 \text{ m}^3}{933,33 \text{ m}^3}$$

$$Fe \text{ en arrabio} = 20000 \times 0,941 = 18820 \text{ Kg.}$$

$$Fe \text{ oxidado} = 18820 \times 0,02 = 376,4 \text{ Kg}$$

$$Fe + \frac{1}{2} O_2 = FeO: O_2 = 376,4 \times \frac{11,2}{56} = 75,28 \text{ m}^3$$

$$\text{Total } O_2 = 244,36 + 933,33 + 75,28 = 1252,97 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = 1252,97/0,21 = 5966,52 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire utilizado} = 5966,52 \text{ m}^3 \text{ (15-1)}$$

2.
 $\text{Rata de } O_2 = 550 \times 0,21 = 115,5 \text{ m}^3/\text{min.}$

$$t_1 \text{ sin oxidación de Fe} = 244,36/115,5 = 2,12 \text{ min.}$$

$$t_2 \text{ sin oxidación de Fe} = 933,33/115,5 = \frac{8,08 \text{ min}}{10,20 \text{ min}}$$

$$t \text{ de oxidación de Fe} = 75,28/115,5 = 0,65 \text{ m}^3$$

$$t_1 \text{ total} = 2,12 + 0,65 \times (2,12/10,20) = 2,26 \text{ min.}$$

$$\text{Duración del 1º periodo} = 2,26 \text{ min. (15-2)}$$

$$t_2 \text{ total} = 8,08 + 0,65 \times (8,08/10,20) = 8,59 \text{ min.}$$

$$\text{Duración del 2º periodo} = 8,59 \text{ min. (15-2)}$$

3.
 Durante el primer periodo el unico gas que se produce es el N_2 del soplo

$$N_2 = 244,36 \times \frac{79}{21} + 75,28 \times \frac{(2,12/19,2) \times 79}{21} = 978,12 \text{ m}^3$$

$$\text{Gas del 1º periodo} = N_2 = 100\% \text{ (15-3)}$$

$$\text{Gas del 2º periodo} = CO + CO_2 + N_2$$

Composición del gas del 2º periodo (15-3)

$CO = 2 \times 560$	$= 1120,00 \text{ m}^3 = 21,42\%$
CO_2	$= 373,33 = 7,14\%$
$N_2 = (933,33 + 75,28 \times 8,08/10,20) \times 79/21$	$= \frac{3735,44}{5278,77 \text{ m}^3} = 71,44\%$
	$100,00\%$

4.
 $\text{Escoria} = SiO_2 + FeO + MnO$

Composición de la escoria (15-4)

$SiO_2 = 20000 \times 0,014 \times 60/28$	$= 600,0 \text{ Kg.} = 49,47\%$
$MnO = 20000 \times 0,005 \times 71/55$	$= 129,1 \text{ Kg.} = 10,64\%$
$FeO = 376,4 \times 72/56$	$= \frac{483,9 \text{ Kg.}}{1213,0 \text{ Kg.}} = 39,89\%$
	$100,00\%$

Contenido de calor en el aire al entrar a 40°C

$$= 906,52 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 40) \times 40 = 72286 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en el arrabio al entrar a 1250°C

$$= 20000 \times 230 + 20000 \times 0,15 \times (1250 - 1100) = 5'050.000 \text{ Kcal}$$

Calor generado por oxidacion (Kcal)

$$\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 = 201000 \times (600/60) = 2'010.000$$

$$\text{Mn} \rightarrow \text{MnO} = 96500 \times (129,1/71) = 175.467$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} = 64300 \times (483,9/72) = 432.150$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO} = 600 \times 2430 = 1'458.000$$

$$\text{C} \rightarrow \text{CO}_2 = 200 \times 8100 = 1'620.000$$

Contenido de calor en los gases al salir (Kcal)

1° periodo a 1420°C:

$$\text{N}_2 = 978,12 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1420) \times 1420 = 462.847$$

2° periodo a 1530°C:

$$\text{CO} + \text{N}_2 = 4855,44 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1530) \times 1530 = 2'493.559$$

$$\text{CO}_2 = 373,33 \times (0,406 + 9,0 \times 10^{-5} \times 1530) \times 1530 = \frac{310.559}{2'804.118}$$

Contenido de calor en el acero (Fe) a 1600°C.

$$\text{Acero líquido} = 20000 \times 0,941 \times 0,98 = 18443,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{Contenido de calor} = 18443,6 \times 334 + 18443,6 \times 0,21 \times (1600 - 1534) = 6'415.791 \text{ Kcal}$$

Contenido de calor en la escoria a 1600°C:

$$= 1213 \times 300 + 1213 \times 0,30 \times (1600 - 1100) = 545850 \text{ Kcal.}$$

Calor de formación de la escoria (Tabla XLIV.B):

$$\text{FeO SiO}_2 = 483,9 \times 114 = 55165$$

$$\text{MnO SiO}_2 = -129,1 \times 66 = -8521$$

$$46644 \text{ Kcal.}$$

BALANCE DE CALOR (15-5)

CALOR DISPONIBLE (Kcal.)			DISTRIBUCION DEL CALOR (Kcal.)		
		(%)			(%)
Aire al entrar	72 286	0,67	Gases 1° periodo	= 462 847	4,26
Arrabio al entrar	= 5 050 000	46,48	Gases 2° periodo	2'804 118	25,81
Formación de escoria	= 46 644	0,43	Acero fundido	= 6 415 791	59,05
Oxidación de Si	= 2'010 000	18,50	Escoria fundida	545 850	5,03
Oxidación de Mn	= 175 467	,61	Perdidas por radiación, etc	= 635 941	5,85
Oxidación de Fe	432 150	3,98	Total	= 10'864 547	100,00
C → CO	= 1'458.000	13,42			
C → CO ₂	= 1'620.000	14,91			
Total	= 10'864.547	100,00			

La elevación de temperatura (7) se puede estimar, dividiendo el calor neto generado por la capacidad calorífica del baño.

1º periodo.

capacidad calorífica del Fe líquido = 0,21:

$$\text{Calor generado} = 2'010\,000 + 175467 + 432150 \times (2\,26 - 10,85) = 2'275\,482 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor distribuido} = 462847 + 635941 \times \frac{1}{2} = 780818 \text{ Kcal}$$

$$\text{Calor neto} = 2'275,482 - 780818 = 1'494,665 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Rata de cambio en temperatura} = \frac{1'494\,665}{20000 \times 0,21 \times 2,26} = 157,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min.}}$$

$$\text{Rata de cambio en temperatura, 1º periodo} = 157,5^{\circ}\text{C/min (15-6)}$$

2º periodo.

$$\text{Calor generado} = 1'458\,000 + 1'620\,000 + 432150 \times (8,59 - 10,85) = 3'420\,135 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor distribuido} = 2'804\,118 + 635941 \times \frac{1}{2} = 3'122,089 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Calor neto} = 3'420,135 - 3'122,089 = 298,047 \text{ Kcal.}$$

$$\text{Rata de cambio en temperatura} = \frac{298,047}{20000 \times 0,21 \times 8,59} = 8,26^{\circ}\text{C/min.}$$

$$\text{Rata de cambio en temperatura, 2º periodo} = 8,26^{\circ}\text{C/min. (15-6)}$$

EJERCICIO N°16 (7)

Un horno de hogar abierto trata una carga de 40 toneladas de arrabio fundido y 44 toneladas de chatarra, se utilizan 5600 kilogramos de mineral para la oxidación y 8000 kilogramos de CaCO_3 como fundente.

ARRABIO (%)	CHATARRA (%)	MINERAL (%)
C = 3,60	C = 0,5	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 73$
Si = 0,90	Si = 0,1	$\text{SiO}_2 = 15$
Mn = ,90	Mn = 0,3	MnO = 12
P = 0,15	P = 0,5	
Fe = 93,45	Fe = 98,6	

El baño, justo antes de la colada lleva 0,5% de carbono y manganeso residual igual al 25% del manganeso original en la chatarra y el arrabio, pero no lleva silicio ni fósforo.

La escoria contiene 20% FeO , todo el cual se asume que proviene de la oxidación de Fe de la chatarra.

El horno utiliza como combustible 10000 Kg. de aceite con 87% C, 15% H, 3% N y para su combustión se utiliza 10% de aire en exceso. A través de las puertas del horno, se introduce aire adicional hasta hacer un total del 50% de exceso. No hay CO en los gases.

Los siguientes son los datos de temperaturas del horno:

Materiales al entrar

Arrabio	= 1250°C
Chatarra, mineral, piedra caliza y aceite	= 0°C
Aire para la combustión	= 1000°C
Aire filtrado por las puertas	= 50°C

Productos al salir

Acero y escoria = 1500°C

Gases = 1600°C

Arrabio en arrabio fundido a 1200°C = 245 Kcal, calor específico líquido = 0,15
 Calor en acero fundido a 1350°C = 300 Kcal.; calor específico = 0,165
 Calor en escoria fundida a 1400°C = 400 Kcal.; calor específico = 0,30
 Asumir el calor de formación de la escoria = 128 Kcal./Kg. de escoria.

PREGUNTAS

1. Un balance de cargas completo del horno.
2. La composición del acero, la escoria y los gases.
3. El porcentaje de la oxidación total realizada por el mineral.
4. El balance de calor de la operación
5. La eficiencia térmica de los regeneradores y del horno, como un todo.

SOLUCION

A continuación se presenta el balance de cargas, los cálculos se harán en todo el ejercicio

BALANCE DE CARGAS (16-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		ACERO		ESCORIA		GASES	
Arrabio	40000,00						
	1410,00	C	413,18	---	---	C	1026,82
S	360,00	---	---	Si	360,00	---	---
Mn	760,00	Mn	223,00	Mn	537,00	---	---
P	60,00	---	---	P	60,00	---	---
Fe	37380,00	Fe	37380,00	---	---	---	---
Chatarra	44000,00						
C	220,00	---	---	---	---	C	220,00
Si	44,00	---	---	Si	44,00	---	---
Mn	132,00	---	---	Mn	132,00	---	---
P	220,00	---	---	P	220,00	---	---
Fe	43384,00	Fe	41757,93	Fe	1626,07	---	---
Mineral	5600,00						
Fe ₂ O ₃	4088,00	Fe	2861,60	O	1226,40	---	---
SiO ₂	840,00	---	---	SiO ₂	840,00	---	---
MnO	672,00	---	---	MnO	672,00	---	---
CaCO ₃	8000,00			CaO	4480,00	CO ₂	3520,00
Aceite	10000,00						
	8700,00	---	---	---	---	C	8200,00
H	1500,00	---	---	---	---	H	1500,00
N	300,00	---	---	---	---	N	300,00
Aire oxida.	15433,88						
N	853,22	---	---	---	---	N	11853,22
O	3580,66	---	---	O	255,75	O	3324,91
Aire comb.	160574,74						
N	12321,40	---	---	---	---	N	12321,40
O	37253,34	---	---	---	---	O	37253,34
Aire adic.	58390,82						
N	44844,15	---	---	---	---	N	44844,15
O	13546,67	---	---	---	---	O	13546,67
Total	341999,44		82635,71		10453,28		248910,41

2
Carga (Kg.)

Arrabio = 40000

$$\begin{aligned}C &= 40000 \times 0,036 = 1440 \\Si &= 40000 \times 0,009 = 360 \\Mn &= 40000 \times 0,019 = 760 \\P &= 40000 \times 0,0015 = 60 \\Fe &= 40000 \times 0,9345 = 37380\end{aligned}$$

Chatarra = 44000

$$\begin{aligned}C &= 44000 \times 0,005 = 220 \\Si &= 44000 \times 0,001 = 44 \\Mn &= 44000 \times 0,003 = 132 \\P &= 44000 \times 0,005 = 220 \\Fe &= 44000 \times 0,986 = 43384\end{aligned}$$

Mineral = 5600

$$\begin{aligned}Fe_2O_3 &= 5600 \times 0,73 = 4088 \\SiO_2 &= 5600 \times 0,15 = 840 \\MnO &= 5600 \times 0,12 = 672\end{aligned}$$

Calculo de la escoria (Kg.)

$$Escoria = SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaO + FeO$$

$$\begin{aligned}Si \text{ oxidado} &= 360 + 44 = 404 \\SiO_2 \text{ formado} &= 404 \times 60/28 = 865,71 \\O \text{ de este} &= 865,71 - 404 = 461,71 \\SiO_2 \text{ a escoria} &= 865,71 + 840 = 1705,71\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mn \text{ (arrabio + chatarra)} &= 760 + 132 = 892 \\Mn \text{ en acero} &= 892 \times 0,25 = 223 \\Mn \text{ oxidado} &= 892 - 223 = 669 \\MnO \text{ formado} &= 669 \times 71/55 = 863,62 \\O \text{ de este} &= 863,62 - 669 = 194,62 \\MnO \text{ a escoria} &= 863,62 + 672 = 1535,62\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P \text{ cargado} &= 60 + 220 = 280 \\P_2O_5 \text{ formado (a escoria)} &= 280 \times 142/62 = 641,29 \\O \text{ de este} &= 641,29 - 280 = 361,29\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}CaCO_3 &= 8000 \\CaO \text{ a escoria} &= 8000 \times 0,56 = 4480 \\CO_2 &= 8000 \times 0,44 = 3520\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Escoria \text{ sin } FeO &= 100 - 20 = 80\% \\Escoria \text{ sin } FeO &= SiO_2 + MnO + P_2O_5 + CaO \\Escoria \text{ sin } FeO &= 1705,71 + 1535,62 + 641,29 + 4480 = 8362,62\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}FeO \text{ en escoria} &= 8362,62 \times 20/80 = 2090,66 \\Fe \text{ de este} &= 2090,66 \times 56/72 = 1626,07 \\O \text{ de este} &= 2090,66 \times 16/72 = 464,59\end{aligned}$$

Composición de la escoria (16-2)

SiO ₂	= 1705,71 Kg.	= 16,32%
MnO	= 1535,62	= 14,69%
P ₂ O ₅	= 641,29	= 6,13%
CaO	= 4480,00	= 42,86%
FeO	= 2090,66	= 20,00%
	10453,28	= 100,00%

$$\text{Acero} = \text{Fe} + \text{Mn} + \text{C}$$

$$\text{Fe cargado} = 37380 + 43384 + 4088 \times 112/160 = 83625,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{Fe} \rightarrow \text{acero} = 83625,6 - 1626,07 = 81999,53$$

$$\text{Acero sin C} = 100 - 0,5 = 99,5\% = 81999,53 + 223 = 82222,53 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} \rightarrow \text{acero} = 82222,53 \times 0,5/99,5 = 413,18 \text{ Kg.}$$

Composición del acero (16-2)

Fe	= 81999,53 Kg.	= 99,23%
Mn	= 223,00	= 0,27%
C	= 413,18	= 0,50%
	82635,71 Kg.	= 100,00%

$$\text{Gas} = \text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$$

$$\text{C (arrabio + chatarra)} \rightarrow \text{gas} = 1026,82 + 220 = 1246,82 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2: \text{O} = 1246,82 \times 32/12 = 3324,85 \text{ Kg.} = 2327,40 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 1246,82 \times 44/12 = 4571,67 \text{ Kg.} = 2327,40 \text{ m}^3$$

O requerido para oxidación de impurezas

$$461,71 - 194,62 - 361,29 + 464,59 + 3324,85 = 4807,06 \text{ Kg.} = 3364,94 \text{ m}^3$$

$$\text{O aportado por Fe}_2\text{O}_3 = 4088 \times 3 \times 16/160 = 1226,4 \text{ Kg.} = 858,48 \text{ m}^3$$

$$\text{O aportado por el aire para oxidación} = 4807,06 - 1226,64 = 3580,66 \text{ Kg.} = 2506,46 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire para oxidación} = 2506,46/0,21 = 11935,52 \text{ m}^3$$

$$\text{C en aceite} = 10000 \times 0,82 = 8200 \text{ Kg.}$$

$$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2: \text{O} = 8200 \times 32/12 = 21866,67 \text{ Kg.} = 15306,67 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 8200 \times 44/12 = 30066,67 \text{ Kg.} = 15306,67 \text{ m}^3$$

$$\text{H en aceite} = 10000 \times 0,15 = 1500 \text{ Kg.}$$

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}: \text{O} = 1500 \times 16/2 = 12000 \text{ Kg.} = 8400 \text{ m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1500 \times 18/2 = 13500 \text{ Kg.} = 16800 \text{ m}^3$$

$$\text{O teórico para combustión} = 21866,67 + 12000 = 33866,67 \text{ Kg.} = 23706,67 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire teórico para combustión} = 23706,67/0,21 = 112888,9 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire exceso adicional} = 112888,9 \times 0,5 = 56444,45 \text{ m}^3$$

$$\text{O}_2 \text{ de este} = 56444,45 \times 0,21 = 11853,33 \text{ m}^3$$

Si interpretamos que el 10% de aire exceso para la combustión, forma parte del 50% del exceso adicional, la composición de gas se podría calcular del siguiente modo:

$$\text{Aire total} = 11935,52 + 112888,9 + 56444,45 = 181268,87 \text{ m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ total en gas} = 181268,87 \times 0,79 + 240 = 143442,41 \text{ m}^3$$

Composición del gas (16-2)

N_2	= 143442,41 m ³	= 74,90%
O_2	= 11853,33	= 6,19%
H_2O	= 16800,00	= 8,77%
CO_2	= 19426,07	= 10,14%
	191521,81 m ³	= 100,00%

3.

$$\begin{aligned} \text{Total óxidos} &= SiO_2 + MnO + P_2O_5 + FeO + CO_2 \\ &= 865,71 + 863,62 + 641,29 + 2090,66 + 4571,67 = 9032,95 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

$$\text{O aportado por el mineral} = 1226,4 \text{ Kg.}$$

Los primeros elementos en oxidarse son el Si y el Mn, los cuales consumen el siguiente oxígeno:

$$\begin{aligned} Si &= 461,71 \text{ Kg.} \\ Mn &= 194,62 \\ &656,33 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

$$\text{O restante} = 1226,4 - 656,33 = 570,07 \text{ Kg.}$$

El P no puede pasar a la escoria mientras exista C de modo que el siguiente elemento en oxidarse es el C.

$$C + O_2 = CO_2: CO_2 = 570,07 \times 44/32 = 783,85 \text{ Kg.}$$

$$\text{Así: } SiO_2 + MnO + CO_2 = 865,71 + 863,62 + 783,85 = 2513,18 \text{ Kg.}$$

$$\text{Oxidación por el mineral} = 2513,18/9032,95 = 0,2782$$

$$\text{Oxidación por el mineral} = 27,82\% \text{ (16-3)}$$

4.

Calor sensible en arrabio fundido a 1250°C:

$$= 40000 \times 245 + 40000 \times 0,15 \times (1250 - 1200) = 10'100.000 \text{ Kcal.}$$

Calor sensible en aire para combustión a 1000°C:

$$(11935,52 + 112888,9 \times 1,1) \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 40'233.604 \text{ Kcal.}$$

Calor sensible en el aire filtrado por las puertas a 50°C:

$$= 112888,9 \times 0,4 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 50) \times 50 = 684333 \text{ Kcal.}$$

Calores de oxidación:

$$\begin{aligned} Si \rightarrow SiO_2 &= 404 \times 7160 &= 2'892.640 \\ Mn \rightarrow MnO &= 669 \times 1757 &= 1'175.433 \\ P \rightarrow P_2O_5 &= 280 \times 5912 &= 1'655.360 \\ Fe \rightarrow FeO &= 1626,07 \times 1151 &= 1'871.607 \\ &&7'595.040 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Calores de combustión:

$$\begin{aligned} C \rightarrow CO_2 &= 9446,82 \times 8100 &= 76'519.242 \\ H \rightarrow H_2O &= 1500 \times 22,4/2 \times 2582 &= 43'377.600 \\ &&119'896.842 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Calor de descomposición del Fe_2O_3 :

$$= (4088/160) \times 198500 = 5'071.675 \text{ Kcal.}$$

Calor de descomposición del CaCO_3 .
 $= 43450 \times 8000 / 100 = 3'476.000 \text{ Kcal.}$

Calor por evaporación del agua
 $= 13500 \times 586 = 7'911.000 \text{ Kcal.}$

Contenido de calor en acero fundido a 1350°C .
 $= 82635,71 \times 300 + 82635,71 \times 0,165 \times (1500 - 1350) = 26'835.947 \text{ Kcal}$

Contenido de calor en escoria fundida a 1400°C :
 $= 10453,28 \times 400 + 10453,28 \times 0,3 \times (1500 - 1400) = 4'494.910 \text{ Kcal}$

Calor de formación de la escoria.
 $= 10453,28 \times 128 = 1'338.020 \text{ Kcal.}$

Contenido de calor en los gases a 1600°C :

$\text{N}_2 + \text{O}_2 = 155295,74 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1600) \times 1600 = 83'785.158$
 $\text{H}_2\text{O} = 16800 \times (0,373 + 5 \times 10^{-5} \times 1600) \times 1600 = 12'176.640$
 $\text{CO}_2 = 19426,07 \times (0,406 + 9 \times 10^{-5} \times 1600) \times 1600 = 17'094.942$
 $113.056.740 \text{ Kcal.}$

BALANCE DE CALOR (16-4)

CALOR DISPONIBLE (Kcal)		(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal)		(%)
Arrabio al entrar	= 10'100.000	5,62	Descomposición Fe_2O_3	5'071.675	2,82
Aire para combustión	= 40'233.604	22,37	Descomposición CaCO_3	3'476.000	1,93
Aire filtrado	= 684.333	0,38	Vaporación de agua	7'911.000	4,40
Oxidación de elementos	= 7'595.040	4,22	Acero al salir	26'835.947	14,94
Combustión	= 119'896.842	66,67	Escoria al salir	= 4'494.910	2,50
Formación de escoria	= 1'338.020	0,74	Gases al salir	= 113'056.740	62,93
Total	= 179'847.839	100,00	Perdidas diferentes	= 19'001.567	10,58
			Total	= 179'847.839	100,00

5

Potencia calorífica del aceite $= 8100C + 34000 \times (H - O/8) + 2200S + 586 \times (9H + W)$
 $= 8200 \times 8100 + 34000 \times 1500 + 586 \times 9 \times 1500 = 109'509.000 \text{ Kcal.}$

Calor utilizado en calentar el aire = 40'233.604 Kcal

Eficiencia de regeneradores = $40'233.604 / 109'509.000 = 0,367$
Eficiencia de regeneradores = 36,7% (16-5)

Calor sensible en el acero = 26'835.947 Kcal
 Total calor disponible = 179'847.839 Kcal.

Eficiencia total del horno = $26'835.947 / 179'847.839 = 0,1494$
Eficiencia total del horno = 14,94% (16-5)

EJERCICIO N°17 (7)

Un horno eléctrico para aceros con capacidad para 10 toneladas, después de una colada, es cargado con 8000 kilogramos de chatarra de acero y 2000 kilogramos de arrabio, y durante el calentamiento se cargan 50 kilogramos de ferromanganeso, 50 de ferrosilicio, 1000 kilogramos de mineral de hierro y 100 de lima.

Las composiciones de los materiales cargados y del acero colado son las siguientes

	Chatarra de acero (%)	Arrabio (%)	Ferromanganeso (%)	Acero final (%)	Ferrosilicio (%)
Fe	99,0	94	13	98,9	48
C	0,5	4	5	0,6	2
Si	0,2	1	2	0,3	50
Mn	0,3	1	80	0,2	

Mineral de hierro (%)	Lima (%)	Electrodos (%)
Fe ₂ O ₃ 90	CaO 100	C 95
SiO ₂ 8		SiO ₂ 5
Al ₂ O ₃ 2		

El aire que se filtra consume 100 Kg. de electrodos.

Calor en la escoria fundida, colada = 500 Kcal/Kg.

Calor en el acero fundido, colado = 325 Kcal/Kg.; peso del acero = 10000 Kg.

Calor de formación de la escoria = 150 Kcal/Kg. de escoria.

Asumir que todo el C pasa a CO.

Energía utilizada = 1500 Kw. por 5 horas. Los gases salen a 1000°C.

PREGUNTAS

1. Un balance de carga de los materiales que pasan a través del horno.
2. Un balance térmico del calor desarrollado y distribuido.
3. La eficiencia térmica neta del horno.

SOLUCION

1.

El cuadro con el balance de cargas aparece en la página siguiente, a continuación presentaremos los cálculos sobre los cuales se fundamenta:

Fe en acero = 9890 Kg.

Fe₂O₃ = 2FeO + O; O = 900 × 16/160 = 90 Kg., FeO = 900 - 90 = 810 Kg.

Fe del acero proveniente del Fe₂O₃
= 9890 - 8000 × 0,99 - 2000 × 0,94 - 100 × 0,13 - 50 × 0,48 = 53 Kg.

FeO reducido = 53 × 72/56 = 68,14

O de este = 68,14 - 53 = 15,14

O total aportado por el Fe₂O₃ = 15,14 + 90 = 105,14 Kg.

FeO a escoria = 810 - 68,14 = 741,86 Kg.

C en acero = 10000 × 0,006 = 60

Si en acero = 10000 × 0,003 = 30

Mn en acero = 10000 × 0,002 = 20

Cálculo del Oxígeno:

Si → SiO₂ = 11 + 20 + 2 = 33 Kg.; SiO₂ formado = 33 × 60/28 = 70,71 Kg.
O = 70,71 - 33 = 37,71

Mn → MnO = 24 + 20 + 60 = 104 Kg.; MnO formado = 104 × 71/55 = 134,25 Kg.
O = 134,25 - 104 = 30,25

O del Si y el Mn = 70,71 + 30,25 = 67,96 Kg.

C del arrabio → CO = 66 Kg.

O de este = 66 × 16/12 = 88 Kg.

CO = 88 + 66 = 154 Kg.

BALANCE DE CARGAS (17-1)

CARGA (Kg.)		PRODUCTOS (Kg.)					
		ACERO		ESCORIA		GASES	
Chatarra	8000						
Fe	7920	Fe	7920	---	---	---	---
C	40	C	40	---	---	---	---
Si	16	Si	5	Si	11	---	---
Mn	24	---	---	Mn	24	---	---
Arrabio	2000						
Fe	1880	Fe	1880	---	---	---	---
C	80	C	14	---	---	C	66
Si	20	---	---	Si	20	---	---
Mn	20	---	---	Mn	20	---	---
Fe-Mn	100						
Fe	13	Fe	13	---	---	---	---
C	5	C	5	---	---	---	---
Si	2	---	---	Si	2	---	---
Mn	80	Mn	20	Mn	60	---	---
Fe-Si	50						
Fe	24	Fe	24	---	---	---	---
C	1	C	1	---	---	---	---
Si	25	Si	25	---	---	---	---
Mineral	1000						
Fe ₂ O ₃	900	Fe	53	FeO	741,86	O	37,18
				O	67,96		
SiO ₂	80	---	---	SiO ₂	80	---	---
Al ₂ O ₃	20	---	---	Al ₂ O ₃	20	---	---
Lima	100						
CaO	100	---	---	CaO	100	---	---
Electrodos	100						
C	95	---	---	---	---	C	95
SiO ₂	5	---	---	SiO ₂	5	---	---
Aire	925,3						
N	710,63	---	---	---	---	N	710,63
O	214,67	---	---	---	---	O	214,67
Total	12275,3		10000		1151,82		1123,48

$$\text{Fe de este} = 88 \times 56/16 = 308$$

$$\text{FeO de este} = 308 + 88 = 396$$

$$\text{FeO a escoria} = 810 - 396 = 414$$

Cálculo de la escoria:

$$\text{SiO}_2 = 70,71 + 80 + 5 = 155,71$$

$$\text{MnO} = 134,25$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 20$$

$$\text{CaO} = 100$$

$$\text{FeO} = 741,86$$

$$1151,82 \text{ Kg.}$$

Cálculo del aire:

$$\text{C} + \text{O} = \text{CO: } \text{C} = 66 + 95 = 161 \text{ Kg.}$$

$$\text{O} = 161 \times 16/12 = 214,67$$

$$\text{N} = 214,67 \times 76,8/23,2 = 710,63$$

$$\text{Aire} = 710,63 + 214,67 = 925,3$$

2.

A continuación se presenta el balance de calor, fundamentado en los cálculos que aparecen más abajo.

BALANCE DE CALOR (17-2)

CALOR DESARROLLADO (Kcal.)	(%)	CALOR DISTRIBUIDO (Kcal)	(%)
Energía utilizada = 6'450.000	86,78	Descomposición de Fe_2O_3 = 454.040	6,11
Combustión $\text{C} \rightarrow \text{CO}$ = 391.230	5,26	Escoria fundida = 575.910	7,75
Oxidación $\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2$ = 236.280	3,18	Acero fundido = 3'250.000	43,72
Oxidación $\text{Mn} \rightarrow \text{MnO}$ = 182.728	2,46	En gases = 282.438	3,80
Formación de escoria = 172.773	2,32	Pérdidas diversas = 2'870.623	38,62
Total = 7'433.011	100,00	Total = 7'433.011	100,00

1 Kw = 860 Kcal./hr.

Calor desarrollado (Kcal.):

Energía suministrada = 1500 Kw por 5 horas.

Calor suministrado = $860 \times 1500 \times 5 = 6'450.000$ Kcal

Calor de combustión: $\text{C} \rightarrow \text{CO} = 161 \times 2430 = 391.230$

Oxidaciones: $\text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 = 33 \times 7160 = 236.280$

$\text{Mn} \rightarrow \text{MnO} = 104 \times 1757 = 182.728$

Calor de formación de escoria = $1151,82 \times 150 = 172773$

Distribución del Calor (Kcal.):

Calor de descomposición del Fe_2O_3

= $198500 \times 900/160 = 1'116.562,5$

Calor por reoxidación del $\text{FeO} = 64300 \times 741,86/72 = 662522$

Calor neto de descomposición del Fe_2O_3

= $1'116.562,5 - 662.522 = 454040$

Contenido de calor en la escoria fundida

= $1151,82 \times 500 = 575810$

Contenido de calor en los gases al salir a 1000°C :

$\text{CO} + \text{N}_2 = 1086,3 \times (0,302 + 2,2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 1000 = 282438$

Las pérdidas por radiación, etc. se calculan por diferencia.

3.

Contenido de calor en acero, escoria y gases

= $575910 + 3'250.000 + 282438 = 4'108.438$ Kcal.

Eficiencia del horno = $4'108.438 / 7'250.283 = 0,5667$

Eficiencia térmica del horno = 56,67% (17-3)

